



TUGAS AKHIR - TE 141599

DESAIN DAN IMPLEMENTASI *CURRENT-CONTROLLED VOLTAGE SOURCE INVERTER* UNTUK KONTROL TEGANGAN DAN FREKUENSI GENERATOR INDUKSI TIGA FASA

Resa Hidayat Pramasdeka
NRP 2212100050

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF CURRENT-CONTROLLED
VOLTAGE SOURCE INVERTER FOR VOLTAGE AND
FREQUENCY CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION
GENERATOR**

Resa Hidayat Pramasdeka
NRP 2212100050

Advisor
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Desain dan Implementasi *Current-Controlled Voltage Source Inverter* untuk Kontrol Tegangan dan Frekuensi Generator Induksi Tiga Fasa**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 17 Januari 2017

Resa Hidayat Pramasdeka
NRP. 2212 100 050

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI *CURRENT-CONTROLLED*
VOLTAGE SOURCE INVERTER UNTUK KONTROL TEGANGAN
DAN FREKUENSI GENERATOR INDUKSI TIGA FASA**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

18-01-17

Dosen Pembimbing II,

Dedet Candra Riawan ST., M.Eng., Ph.D. Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.
NIP. 197311192000031001 NIP. 196510121990031003

**SURABAYA
JANUARI, 2017**

DESAIN DAN IMPLEMENTASI *CURRENT-CONTROLLED VOLTAGE SOURCE INVERTER* UNTUK KONTROL TEGANGAN DAN FREKUENSI GENERATOR INDUKSI TIGA FASA

Nama : Resa Hidayat Pramasdeka
Pembimbing I : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Pembimbing II : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Mesin induksi dapat menghasilkan daya saat kecepatannya di atas kecepatan sinkron, bisa disebut juga sebagai generator induksi. Mesin induksi memiliki kelebihan yaitu konstruksinya yang simpel, level *short-circuit* yang rendah, perawatan yang mudah, dan harganya lebih murah. Dari semua kelebihan tersebut, mesin induksi juga memiliki kekurangan saat difungsikan sebagai generator yaitu karakteristik regulasi tegangan dan frekuensi yang tidak memuaskan serta membutuhkan daya reaktif untuk menjaga eksitasi. Perlu diketahui bahwa generator induksi tidak menghasilkan daya reaktif, tetapi membutuhkan daya reaktif dari luar. Untuk mengatasi masalah di atas, digunakanlah elektronika daya dengan menerapkan metode *Current-Controlled* pada *Voltage Source Inverter (CC-VSI)* sebagai pengontrol tegangan dan frekuensi output dari generator serta menyediakan daya reaktif. Sistem tersebut diperoleh dengan memberikan sinyal *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)* ke IGBT/MOSFET pada inverter untuk pensaklaran. Kontrol tegangan dilakukan dengan menjaga tegangan di sistem konstan, dengan cara mengontrol arus output inverternya. Kontrol frekuensi dilakukan dengan memberikan input frekuensi sinyal referensi pada gelombang SPWM. Sedangkan daya reaktif akan disuplai menuju beban dan untuk eksitasi generator. Sehingga dengan adanya CC-VSI, aliran daya pada sistem terjaga konstan dan eksitasi generator terpenuhi.

Kata Kunci: Generator induksi, *current-controlled*, *voltage source inverter*, *sinusoidal pulse width modulation*.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF CC-VSI FOR VOLTAGE AND FREQUENCY CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION GENERATOR

Name : Resa Hidayat Pramasdeka
Advisor I : Dedet Candra Riawan ST, M.Eng., Ph.D.
Advisor II : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

Induction machine can generate power when the speed is above its synchronous speed, can be referred to as induction generator. Induction machine has the advantages of its simple construction, low short-circuit level, easy maintenance, and the price is cheaper. Of all these advantages, the induction machine also has shortcomings when used as a generator, that is the unsatisfactory characteristic of voltage and frequency regulation and in need of reactive power to maintain its excitation. Note that the induction generator does not produce reactive power, but require reactive power from the outside. To solve the problem above, the power electronics is used to apply the method on a Current-Controlled Voltage Source Inverter (CC-VSI) as a control voltage and frequency output of the generator and provide reactive power. The system obtained by giving signal Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) to IGBT / MOSFET inverter for switching. Voltage control is done by maintaining a constant voltage in the system, by controlling the inverter output current. Frequency control is done by providing input frequency reference signal on SPWM wave. While the reactive power to be supplied to the load and to excite generator. So with CC-VSI, the power flow on the system maintained constant and the generator excitation can be met.

Keywords : *Induction generator, current-controlled, voltage source inverter, sinusoidal pulse width modulation.*

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik, lancar dan tepat waktu. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan guna menyelesaikan pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan judul:

DESAIN DAN IMPLEMENTASI *CURRENT-CONTROLLED VOLTAGE SOURCE INVERTER* UNTUK KONTROL TEGANGAN DAN FREKUENSI GENERATOR INDUKSI TIGA FASA

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis memperoleh banyak bantuan dari berbagai pihak, karena itu penulis mengucapkan segenap terima kasih kepada:

1. Kedua orangtua penulis yang selalu memberikan doa dan kepercayaan.
2. Bapak Dedet Candra Riawan dan Bapak Mochamad Ashari selaku dosen pembimbing atas segala curahan tenaga dan waktu untuk memberikan arahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
3. Teman-teman Laboratorium B.102 mas Ciptian, mas Ari, mas Adi, dan mas Beki yang telah memberikan bimbingan dan motivasi.
4. Teman-teman bidang studi Elka angkatan 2012 Ardian Wardhana, Rendy Setiawan, Fajar Rinaldi U., dan Anggarjuna Puncak P.P.
5. Teman-teman dari UKM Merpati Putih ITS yang selalu ada untuk memberikan dukungan.
6. Serta semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis sangat bersyukur mendapatkan ilmu yang sangat bermanfaat dari proses pengerjaan tugas akhir ini. Tugas akhir ini merupakan pintu awal bagi penulis untuk dapat mencapai cita-citanya. Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat dikembangkan lebih baik untuk perkembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Surabaya, 17 Januari 2017

Penulis

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Metodologi Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Laporan	4
1.6 Relevansi.....	5
BAB II GENERATOR INDUKSI DAN CURENT-CONTROLLED VOLTAGE SOURCE INVERTER	
2.1 Generator Induksi.....	7
2.2 <i>Voltage Source Inverter (VSI) 3 Fasa</i>	8
2.3 <i>Pulse Width Modulation</i>	9
2.4 Sinusoidal PWM	10
2.5 <i>Current Controlled PWM VSI 3 Fasa.</i>	11
2.6 <i>Voltage Source Current Controlled PWM</i>	12
BAB III PEMODELAN DAN IMPLEMENTASI RANGKAIAN CC- VSI	
3.1 Desain Sistem.....	15
3.2 Parameter Generator Induksi	16
3.3 Simulasi	17
3.3.1 Desain <i>Current-Controlled VSI 3 Fasa</i>	19
3.3.2 Desain Kontrol Tegangan Generator	21
3.4 Model Implementasi Sistem	22

3.5 Implementasi Generator Induksi	23
3.6 Inverter Tiga Fasa	25
3.7 Rangkaian Driver	25
3.8 Pembangkit <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i> (SPWM)	26
3.9 Implementasi Induktor dan Kapasitor	28
3.10 Implementasi Beban	29
BAB IV HASIL SIMULASI, IMPLEMENTASI, DAN ANALISIS	
DATA	
4.1 Hasil Simulasi	33
4.1.1 Aliran Daya pada Kondisi Perubahan Kecepatan	33
4.1.2 Kontrol Tegangan	34
4.1.3 Kontrol Frekuensi	35
4.2 Hasil Implementasi	36
4.2.1 Pengujian Sinyal SPWM	36
4.2.2 Pengujian CC-VSI Tanpa Beban	38
4.2.3 Pengujian CC-VSI Beban Resistif	41
4.2.4 Pengujian CC-VSI dan Generator dengan Perubahan Kecepatan	43
4.2.5 Pengujian Aliran Daya Reaktif Generator	47
4.2.6 Pengujian Aliran Daya Aktif Generator	51
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	59
RIWAYAT HIDUP	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Topologi Sistem <i>Stand-Alone</i> dengan Kecepatan Tetap.....	2
Gambar 2.1 Karakteristik Torsi-Kecepatan Mesin Induksi.....	7
Gambar 2.2 Generator Induksi Beroperasi Sendiri (Standalone)	8
Gambar 2.3 Topologi VSI 3 Fasa	9
Gambar 2.4 Sinyal Modulasi dan Sinyal Input 3 Fasa.....	10
Gambar 2.5 Input Sinyal PWM S_1 dan S_3	10
Gambar 2.6 Sinyal Hasil Inverter PWM pada 1 Fasa	11
Gambar 2.7 Linear Current Controlled PWM	11
Gambar 2.8 Voltage Source Current-Controlled PWM Inverter.....	12
Gambar 3.1 Desain Sistem	15
Gambar 3.2 Simulasi <i>Close-Loop</i>	18
Gambar 3.3 Simulasi <i>Open-Loop</i>	19
Gambar 3.4 <i>Current-Controlled</i> PWM.....	20
Gambar 3.5 Desain Kontrol Tegangan.....	21
Gambar 3.7 Implementasi Generator Induksi	24
Gambar 3.8 Variable Frequency Drive	24
Gambar 3.9 Implementasi Inverter Tiga fasa	25
Gambar 3.10 (a) Skema Rangkaian TLP250 (b) Implementasi Driver .	26
Gambar 3.11 Arduino Mega 2560	26
Gambar 3.12 (a) NOT GATE dan Konfigurasi IC (b) Implementasi IC27	
Gambar 3.13 Induktor Tiga Fasa	28
Gambar 3.14 Implementasi Kapasitor Tiga Fasa	29
Gambar 3.16 Beban Resistif Tiga Fasa.....	31
Gambar 4.1 Aliran Daya dengan Penambahan Beban	33
Gambar 4.2 (a) Tegangan Sistem (b) Arus Inverter	34

Gambar 4.3 (a) Frekuensi 20Hz (b) Frekuensi 50Hz (c) Frekuensi 70Hz	35
Gambar 4.4 Kontrol Frekuensi pada Perubahan Beban	36
Gambar 4.5 Sinyal SPWM	37
Gambar 4.6 Output <i>Inverting</i> SPWM.....	37
Gambar 4.7 Tegangan Output Inverter: (a) Hasil Implementasi (b) Hasil Simulasi.....	38
Gambar 4.8 Gelombang Tegangan Output Inverter.....	39
Gambar 4.9 Gelombang Tegangan Output Inverter: (a) Frekuensi 50 Hz; (b) Frekuensi 60 Hz.....	40
Gambar 4.10 Gelombang Output Inverter dengan Filter L	41
Gambar 4.11 Gelombang Output Inverter dengan Filter LC.....	42
Gambar 4.12 Simulasi Perubahan Kecepatan Generator Induksi: (a) 1580.3 rpm; (b) 1638.2 rpm.....	46
Gambar 4.13 Pengujian pada Tegangan 20V _{DC} : (a) Tegangan dan Arus Generator; (b) Tegangan dan Arus Beban.....	48
Gambar 4.14 Hasil Simulasi <i>open-loop</i> : (a) Tegangan dan Arus Generator; (b) Tegangan dan Arus Beban.....	49
Gambar 4.15 Simulasi Aliran Daya Reaktif	51
Gambar 4.16 Simulasi Aliran Daya Aktif	53
Gambar 4.1 Aliran Daya dengan Penambahan Beban	33
Gambar 4.2 (a) Tegangan Sistem (b) Arus Inverter.....	34
Gambar 4.3 (a) Frekuensi 20Hz (b) Frekuensi 50Hz (c) Frekuensi 70Hz	35
Gambar 4.4 Kontrol Frekuensi pada Perubahan Beban	36
Gambar 4.5 Sinyal SPWM	37
Gambar 4.6 Output <i>Inverting</i> SPWM.....	37
Gambar 4.7 Tegangan Output Inverter: (a) Hasil Implementasi (b) Hasil Simulasi.....	38
Gambar 4.8 Gelombang Tegangan Output Inverter.....	39

Gambar 4.9 Gelombang Tegangan Output Inverter: (a) Frekuensi 50 Hz; (b) Frekuensi 60 Hz	40
Gambar 4.10 Gelombang Output Inverter dengan Filter L	41
Gambar 4.11 Gelombang Output Inverter dengan Filter LC	42
Gambar 4.12 Simulasi Perubahan Kecepatan Generator Induksi: (a) 1580.3 rpm; (b) 1638.2 rpm	46
Gambar 4.13 Pengujian pada Tegangan 20V _{DC} : (a) Tegangan dan Arus Generator; (b) Tegangan dan Arus Beban.....	48
Gambar 4.14 Hasil Simulasi <i>open-loop</i> : (a) Tegangan dan Arus Generator; (b) Tegangan dan Arus Beban.....	49
Gambar 4.15 Simulasi Aliran Daya Reaktif.....	51
Gambar 4.16 Simulasi Aliran Daya Aktif	53

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Mesin Induksi	16
Tabel 3.2 Parameter Mesin Induksi	17
Tabel 4.1 Pengujian pada Tegangan 15V	44
Tabel 4.2 Pengujian pada Tegangan 20V	44
Tabel 4.3 Pengujian pada Tegangan 30V	44
Tabel 4.4 Pengujian pada Tegangan 40V	45
Tabel 4.5 Pengujian pada Tegangan 50V	45
Tabel 4.6 Arus Dummy Load	46
Tabel 4.7 Data Pengujian Daya Reaktif pada Tegangan 20V	50
Tabel 4.8 Data Pengujian Daya Aktif pada Tegangan 20V	52
Tabel 4.9 Perbandingan Daya Aktif pada Tegangan 20V	53

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB I

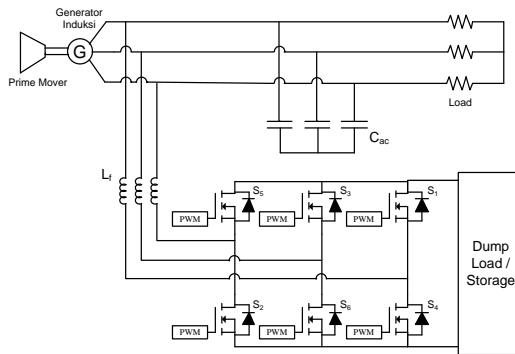
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Maraknya pemanfaatan energi terbarukan (*renewable energy*) menjadi sebuah tantangan tersendiri demi kemajuan konsumsi energi dunia. Pembangkitan listrik menggunakan energi terbarukan merupakan sumber energi yang bersih dan dapat digunakan secara terus-menerus. Indonesia memiliki banyak potensi sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk menambah kapasitas energi listrik sehingga dapat memasok energi ke konsumen yang semakin lama semakin bertambah. Karena penyebaran listrik yang belum merata, daerah yang terpencil bisa memanfaatkan sumber energi terbarukan sebagai pembangkit *stand-alone*.

Sumber energi terbarukan yang biasanya terletak di daerah terpencil di mana pasokan utilitas tidak tersedia atau sering terputus, sehingga sering menempatkan sumber energi dengan sistem *stand-alone* untuk memasok beban. Sumber energi tersebut dapat berupa air, angin, cahaya matahari, dan lain sebagainya. Situasi seperti ini mengharuskan sistem pembangkit listrik energi terbarukan melakukan regulasi tegangan agar kualitas daya yang dihasilkan dapat digunakan dengan baik [1]. Dalam pembangkitan energi terbarukan generator induksi lebih sering digunakan karena lebih cocok dengan digunakan pada kecepatan yang berubah-ubah dan perawatannya yang mudah. Masalah yang ada pada sistem *stand-alone* adalah pada keefektifan konsumsi dayanya, karena penggunaan beban akan berubah tergantung dari waktu ataupun keadaan. Karena itu diperlukan sebuah sistem agar kontinuitas daya dapat terjaga.

Salah satu contoh pada aplikasi sistem *stand-alone* seperti topologi di bawah[2]:



Gambar 1.1 Topologi Sistem *Stand-Alone* dengan Kecepatan Tetap

Pada sistem pembangkitan listrik, generator dikopel oleh *prime mover* dari turbin sehingga dapat menghasilkan daya. Kemudian output generator induksi disambungkan ke sebuah inverter tiga fasa. Fungsi dari inverter ini adalah mengkonversikan AC (*Alternating Current*) ke DC (*Direct Current*) yang kemudian arus tersebut akan disimpan ke dalam baterai. VSI memiliki tiga fungsi penting dalam sistem yaitu:

- Menetapkan frekuensi generator induksi agar konstan
- Memberikan mekanisme regulasi tegangan sistem
- Mengganti daya reaktif yang dibutuhkan generator induksi dan beban AC

Beban pada bagian DC bisa berupa resistor untuk membuang daya berlebih atau berupa baterai. Dengan menggunakan baterai, daya berlebih yang dihasilkan generator bisa disimpan dan dapat digunakan untuk penambah daya saat dalam kondisi kelebihan beban [1].

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

- Bagaimana proses aliran daya pada sistem generator induksi rotor sangkar.
- Bagaimana hasil simulasi rangkaian *Current-Controlled Voltage Source Inverter*.
- Bagaimana mengimplementasikan rangkaian *Current-Controlled Voltage Source Inverter* dengan sistem *storage*.

- 4) Bagaimana analisa dan perbandingan hasil simulasi dengan hasil implementasi rangkaian *Current-Controlled Voltage Source Inverter* dengan sistem *storage*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian Tugas Akhir ini ialah:

- 1) Mengetahui cara kerja *Current-Controlled Voltage Source Inverter* dalam sistem *stand-alone*.
- 2) Merancang dan mengimplementasikan *Current-Controlled Voltage Source Inverter*.
- 3) Membandingkan dan menganalisa hasil implementasi *Current-Controlled Voltage Source Inverter* dengan hasil dari desain dan simulasi pada perangkat lunak.

1.4 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah:

1. Studi literatur

Penulis mempelajari tentang pengoperasian generator induksi dengan pemasangan rangkaian VSI. Penulis mendapatkan referensi melalui IEEE dan buku-buku yang membahas tentang generator induksi dan inverter tiga fasa.

2. Pengumpulan data

Setelah melakukan studi literatur, penulis melakukan pengumpulan data tentang parameter-parameter mesin induksi dan inverter. Parameter didapatkan dari hasil Tugas Akhir alumni tentang rewinding motor induksi. Parameter yang didapatkan seperti resistansi stator (R_s), resistansi rotor (R_r), reaktansi stator (X_s), reaktansi rotor (X_r), dan reaktansi magnetisasi (X_m) yang selanjutnya dimasukkan ke dalam software simulasi. Sedangkan parameter inverter didapatkan dari parameter mesin yang digunakan dan *datasheet* komponen yang akan digunakan.

3. Pemodelan dan Simulasi

Setelah parameter-parameter mesin induksi didapatkan, penulis memasukkan parameter tersebut pada software. Penulis juga melakukan pemodelan terhadap sistem dan mendesain kontroler yang digunakan dalam sistem ini. Kemudian melakukan simulasi dari sistem yang telah didesain.

4. Implementasi Alat

Dari permodelan simulasi yang telah dibuat, didapatkan desain *voltage source inverter* yang selanjutnya diimplementasikan.

Penulis melakukan pengujian inverter untuk mengeksitasi mesin induksi sehingga didapatkan data hasil implementasi berupa aliran daya pada sistem.

5. Analisis data

Dari simulasi dan implementasi yang dilakukan didapatkan hasil yang dapat dianalisis. Penulis melakukan analisis tentang pengoperasian generator induksi dengan pemasangan rangkaian *voltage source inverter* sebagai pengatur output generator induksi kemudian dibandingkan antara hasil simulasi dan implementasi.

6. Kesimpulan

Dari hasil analisis yang dilakukan dapat ditarik suatu kesimpulan. Dari kesimpulan tersebut dapat diketahui jawaban dari permasalahan.

7. Penulisan Buku Tugas Akhir

Hasil-hasil yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini akan dilaporkan dalam bentuk buku Tugas Akhir.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab akan terurai sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisikan penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi Tugas Akhir.

BAB 2 Teori Penunjang

Bab ini berisikan tentang teori dasar dari tentang generator induksi, *voltage source inverter*, *pulse width modulation*, *sinusoidal pwm*, dan pengaturan tegangan dan frekuensi output generator induksi dengan menggunakan rangkaian VSI.

BAB 3 Pemodelan, Simulasi, dan Implementasi

Bab ini berisikan tentang pemodelan sistem. Sistem pada umumnya terdiri dari: prime mover, generator induksi, rangkaian VSI, dan kontroller yang digunakan. Pada bab ini dilakukan pemodelan terhadap sistem tersebut, kemudian disimulasikan dan diimplementasikan.

BAB 4 Analisis Hasil Simulasi dan Implementasi

Bab ini berisikan hasil analisis dari simulasi dan implementasi yang dilakukan.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisikan kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk pengembangan selanjutnya.

1.6 Relevansi

Tugas Akhir ini bisa dijadikan sebagai referensi untuk mengetahui tentang pengaturan output generator induksi dengan pemasangan rangkaian VSI. Tugas Akhir ini juga dapat menjadi pertimbangan untuk mengoptimalkan pengoperasian generator induksi penguatan sendiri untuk diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

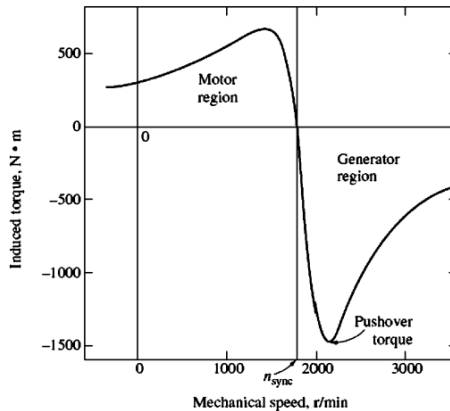
BAB II

Generator Induksi dan *Curent-Controlled Voltage Source Inverter*

2.1 Generator Induksi

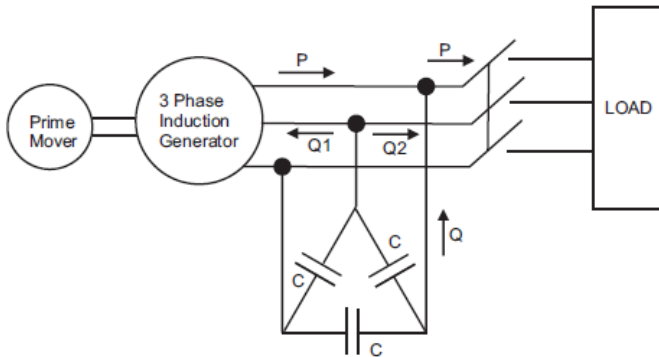
Mesin induksi bisa difungsikan sebagai motor atau generator. Mesin akan berfungsi sebagai motor jika kecepatan putarnya di bawah kecepatan sinkron dan akan berubah menjadi generator jika kecepatannya di atas kecepatan sinkron. Generator induksi tidak dapat menghasilkan daya reaktif, tetapi membutuhkan daya reaktif sehingga dibutuhkan daya reaktif dari luar untuk mempertahankan medan magnet stator. Kelebihan dari generator induksi adalah tidak membutuhkan sirkuit medan terpisah dan tidak perlu diputar terus-menerus pada kecepatan tetap.

Karakteristik torka-kecepatan mesin induksi seperti kurva pada Gambar 2.1 memperlihatkan bahwa jika motor induksi diputar pada kecepatan yang lebih tinggi daripada n_{sync} oleh sebuah penggerak mula (*prime mover*) eksternal, arah torka induksinya akan berbalik dan motor akan berlaku sebagai sebuah generator. Dengan bertambahnya torka yang diberikan penggerak mula kepada porosnya, besar daya yang dihasilkan oleh generator induksi ikut bertambah. Seperti diperlihatkan gambar, terdapat nilai torka induksi maksimum yang mungkin pada mode operasi generator. Torka ini disebut dengan torka *pushover*. Jika torka yang diberikan penggerak mula kepada poros melebihi torka *pushover*, generator akan *overspeed*.



Gambar 2.1 Karakteristik Torsi-Kecepatan Mesin Induksi [3]

Generator induksi juga dimungkinkan untuk beroperasi sebagai generator *isolated*, yang tidak terhubung kepada sistem tenaga manapun selama terdapat kapasitor yang dapat mensuplay daya reaktif yang dibutuhkan generator dan beban-beban yang dihubungkan. Generator *isolated* seperti ini diperlihatkan pada Gambar 2.2.

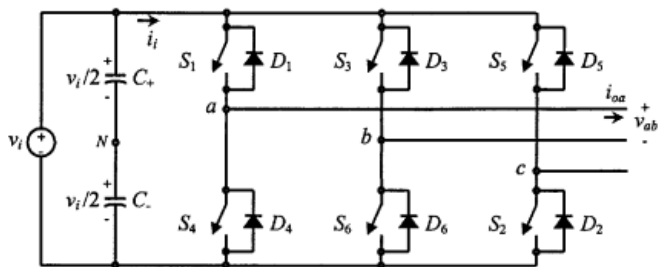


Gambar 2.2 Generator Induksi Beroperasi Sendiri (Standalone) [3]

Karena sifat alami karakteristik torka-kecepatan mesin induksi, frekuensi generator induksi berubah-ubah dengan perubahan beban, tapi karena karakteristik torka-kecepatan sangat curam pada wilayah operasi normal, variasi frekuensi total biasanya dibatasi di bawah 5 persen. harga variasi ini cukup dapat diterima pada banyak aplikasi generator *isolated* atau emergensi.

2.2 Voltage Source Inverter (VSI) 3 Fasa

VSI satu fasa mencakup aplikasi pada daya rendah dan VSI tiga fasa mencakup aplikasi pada daya menengah dan daya tinggi. Tujuan utama dari topologi ini adalah untuk menyediakan sumber tegangan tiga fasa dimana amplitudo, fase, dan frekuensi dari tegangan selalu dapat dikontrol [4]. Topologi standar dari VSI tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Topologi VSI 3 Fasa [4]

Rangkaian VSI terdiri dari enam saklar, dimana saklar tersebut dapat berupa BJT (*Bipolar Junction Transistor*), FET (*Field Effect Transistor*), atau IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Masing-masing saklar memiliki karakteristik yang berbeda, BJT dikendalikan menggunakan aliran arus sedangkan FET dan IGBT dikendalikan menggunakan tegangan. Inputnya dapat berupa sinyal PWM dengan frekuensi tinggi.

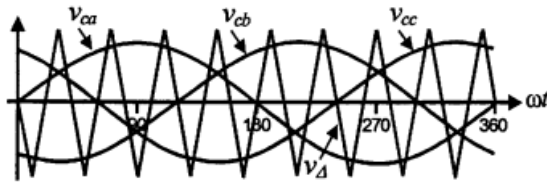
2.3 Pulse Width Modulation

Tegangan output dari inverter dapat diatur dengan menjalankan kontrol dalam inverter. Metode paling efisien adalah dengan menggunakan pulse width modulation (PWM). Dalam metode ini, input tegangan dc tetap diberikan kepada inverter dan output tegangan ac didapatkan dengan mengatur mati nyala dalam periode tertentu pada inverter menggunakan PWM. Konsep dari Pulse Width Modulation (PWM) adalah memberikan duty cycle yang berbeda-beda di saklar konverter pada frekuensi tinggi untuk memperoleh output tegangan atau arus dengan frekuensi yang diinginkan (50 atau 60 Hz). Tujuan lainnya adalah untuk mengetahui cara yang paling efektif mengatur proses pensaklaran untuk meminimalisasi distorsi harmonis atau losses pensaklaran [5]. Ketika amplitudo sinyal sinus yang dimodulasi lebih besar dari sinyal segitiga karier, maka akan terjadi *over* modulasi [6]. Keuntungan dari penggunaan PWM adalah:

- a) Kontrol tegangan output dengan metode ini dapat diperoleh tanpa tambahan komponen.
- b) Harmonisa lebih mudah untuk dihilangkan atau diminimalisir dengan menggunakan filter harmonisa.

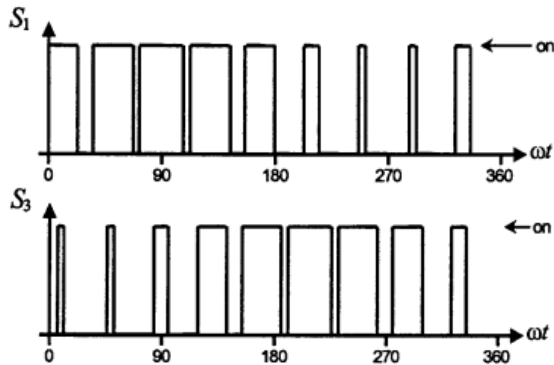
2.4 Sinusoidal PWM

Teknik PWM ini dilakukan dengan cara mengkomparasi sinyal sinus dan sinyal segitiga. Sinyal segitiga ini berfungsi sebagai sinyal karier yang frekuensinya bisa diatur sesuai kebutuhan. Pada VSI 3 fasa, untuk menghasilkan tegangan beban berbeda 120° , dibutuhkan tiga sinyal modulasi yang berbeda 120° pula [4].



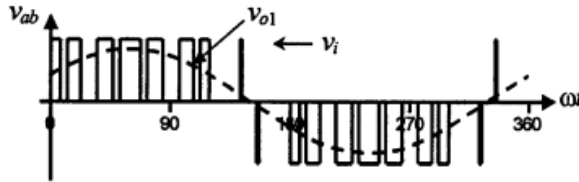
Gambar 2.4 Sinyal Modulasi dan Sinyal Input 3 Fasa [4]

Gambar 2.4 memperlihatkan input sinyal tiga fasa yang dibandingkan dengan sinyal segitiga. Sedangkan pada Gambar 2.5 adalah output PWM pada saklar S_1 dan S_3 . Sinyal tersebut adalah hasil dari proses modulasi dimana sinyal tersebut berbeda sudut 120° .



Gambar 2.5 Input Sinyal PWM S_1 dan S_3 [4]

Gambar 2.6 menunjukkan bagaimana bentuk gelombang hasil output inverter pada V_{ab} . Gelombang adalah berupa gelombang AC hasil output pensaklaran yang masih berbentuk kotak.

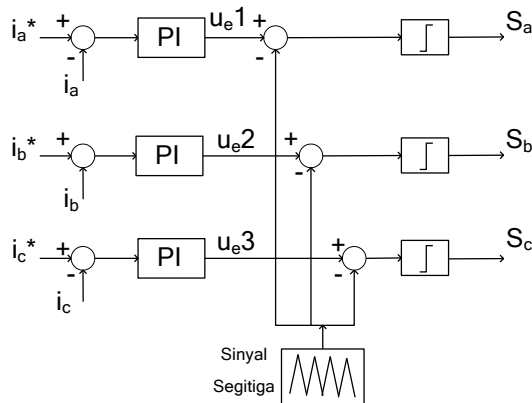


Gambar 2.6 Sinyal Hasil Inverter PWM pada 1 Fasa [4]

2.5 Current Controlled PWM VSI 3 Fasa.

Current controlled PWM merupakan salah satu metode yang bisa digunakan untuk mengatur kondisi pensaklaran inverter 3 fasa. Tujuan dari metode ini adalah mengatur arus output inverter mengikuti arus referensi yang diberikan. Pada umumnya teknik *current control* VSI 3 fasa dapat dibagi menjadi *linear control*, *hysterisis control*, *predictive control*, *delta modulation control* dan *neural-fuzzy control*. Dalam tugas akhir ini hanya akan dibahas tentang *linear current controlled*.

Linear current controlled atau dapat juga disebut dengan *sine-triangle regulator* merupakan metode *current controlled* yang dapat digunakan untuk mengatur arus output dari inverter. Metode kontrol ini menggunakan tiga controller PI yang digunakan pada masing-masing fasa. Prinsip sederhana dari metode kontrol ini adalah membandingkan sinyal referensi dengan sinyal terukur output inverter. Kemudian akan menghasilkan suatu sinyal output controller PI yang akan dimodulasikan dengan sinyal segitiga. Hasil modulasi tersebut akan digunakan untuk pensaklaran pada inverter 3 fasa.



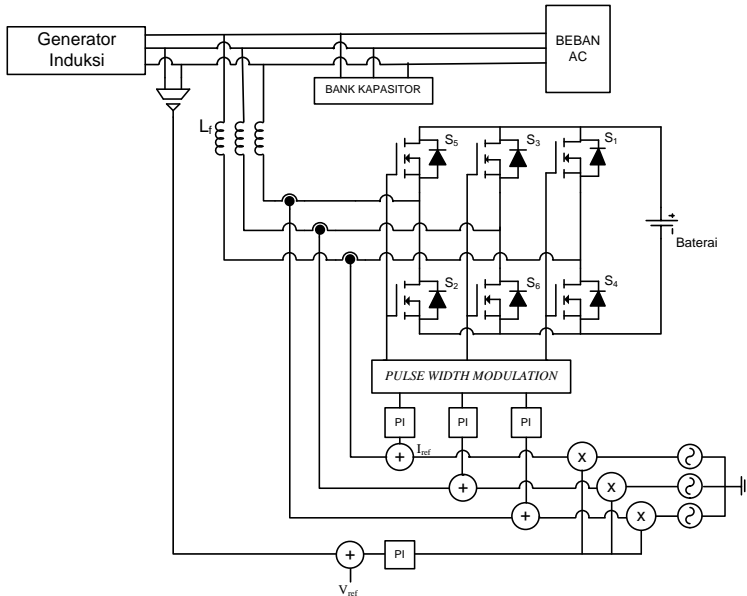
Gambar 2.7 Linear Current Controlled PWM

Gambar 2.7 di atas menunjukkan salah satu metode *current controlled* yang digunakan untuk mengatur pensaklaran dari inverter. Arus output dari inverter akan mengikuti besarnya arus referensi yang diberikan.

Hasil dari modulasi sinyal output PI controller dengan sinyal segitiga berupa sinyal PWM yang digunakan untuk pensaklaran VSI. S_a adalah PWM sinyal pensaklaran untuk S_1 dan S_4 , S_b PWM sinyal pensaklaran untuk S_3 dan S_6 , S_c adalah PWM sinyal pensaklaran untuk S_2 dan S_5 .

2.6 Voltage Source Current Controlled PWM

Voltage source current controlled PWM yaitu proses dimana sinyal PWM dibangkitkan oleh sinyal referensi dari tegangan terminal. Tujuan dari kontrol ini adalah menjaga tegangan di terminal sistem tetap konstan. Metode kontrol konverter digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.8 Voltage Source Current-Controlled PWM Inverter [7]

Fungsi dari sistem kontrol ini adalah untuk mengatur aliran daya aktif dimana sisi DC konstan karena berupa baterai. Jika daya generator melebihi kebutuhan beban, maka daya sisa akan mengalir ke inverter dan disimpan di dalam baterai. Jika beban lebih besar dari kapasitas

generator, maka baterai akan ikut menyuplai daya ke beban. Hal ini dilakukan dengan metode *current-controlled*, sehingga didapatkan sinyal berupa *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM). Sinyal tersebut kemudian digunakan pada IGBT/MOSFET pada konverter.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

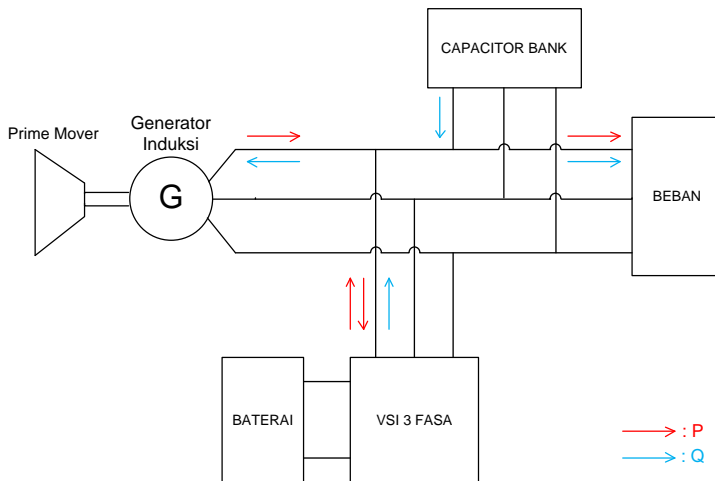
BAB III

Pemodelan dan Implementasi Rangkaian CC-VSI

Dalam bab ini akan dibahas mengenai desain pemodelan dan implementasi dari sistem yang direncanakan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software.

3.1 Desain Sistem

Untuk mengatur output generator induksi dapat menggunakan rangkaian VSI. Desain dan aliran daya sistem yang dimodelkan dengan program simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Desain Sistem

Fungsi dari rangkaian VSI adalah menghasilkan arus reaktif yang digunakan untuk membangkitkan medan magnet pada rotor generator induksi. Besarnya arus yang dikeluarkan VSI bergantung pada metode *switching* VSI. Dengan mengatur besarnya arus reaktif yang mengalir dapat diatur tegangan output generator induksi. Frekuensi output generator induksi akan mengikuti frekuensi *switching* VSI 3 fasa yang diatur konstan 50 Hz.

Tujuan utama pemasangan rangkaian VSI pada pengoperasian generator induksi adalah untuk mengatur tegangan dan frekuensi output generator induksi konstan. Hal ini dilakukan dengan cara mengoperasikan generator induksi dengan daya output yang konstan.

Daya output generator induksi dapat dialirkan ke beban dan dapat diserap rangkaian VSI. Serta VSI dapat menyuplai daya ke beban saat kondisi kelebihan beban. Daya aktif yang dihasilkan generator induksi dapat dirumuskan:

$$P_{gen} = P_{beban} + P_{inv} \quad (3.1)$$

$$P_{gen} = P_{beban} - P_{inv} \quad (3.2)$$

P_{gen} = Daya aktif yang dihasilkan generator

P_{inv} = Daya aktif yang diserap inverter

P_{beban} = Daya yang disalurkan ke beban.

Apabila terjadi pengurangan beban, rangkaian VSI akan menyerap daya yang tidak dialirkan ke beban. Dan apabila terjadi kelebihan beban, rangkaian VSI akan menyuplai daya ke beban. Sehingga pada sisi DC VSI dipasang baterai yang digunakan untuk menyerap dan menyuplai daya.

Untuk menganalisis rangkaian VSI tersebut, dilakukan pemodelan terhadap masing-masing komponen. Komponen-komponen yang diimplementasikan adalah inverter tiga fasa dan pembangkit sinyal SPWM untuk *current-controlled*.

3.2 Parameter Generator Induksi

Mesin induksi yang digunakan sebagai referensi adalah mesin induksi yang ada di laboratorium dengan spesifikasi peralatan sebagai berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi Mesin Induksi

Parameter	Nilai
Type	EM802-4 (Rewinding)
HP	1
V	56
A	8.5
Seri No	001321
IP	55
Hz	50

Mesin ini menggunakan rotor jenis sangkar (*squirrel cage rotor*). Untuk mengisi parameter yang dibutuhkan oleh *software* simulasi, maka dilakukan tes mesin induksi. Dari tes yang dilakukan, didapat parameter sebagai berikut[8]:

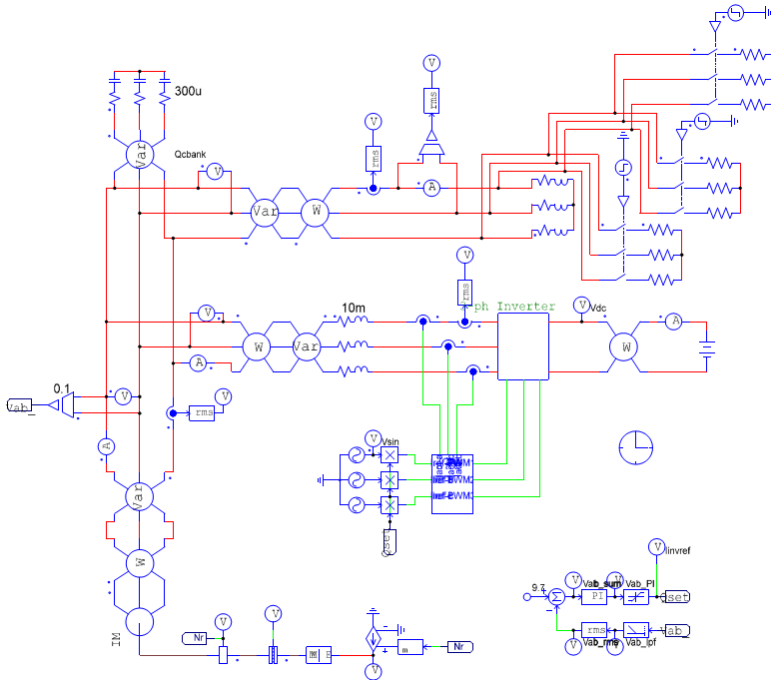
Tabel 3.2 Parameter Mesin Induksi

Parameter	Nilai
R_1	1,0297 Ω
X_2	1,02 Ω
R_2	0,4973 Ω
X_2	1,02 Ω
X_M	12,3771 Ω
V_{TH}	51,584 V
R_{TH}	0,879 Ω
X_{TH}	1,02 Ω
S_{max}	22,39 %
τ_{max}	8,19257 N.m
τ_{ind}	5,46542 N.m
τ_{start}	4,1716 N.m

Parameter-parameter tersebut akan disesuaikan dengan kebutuhan data pada simulasi mesin induksi dan implementasi CC-VSI.

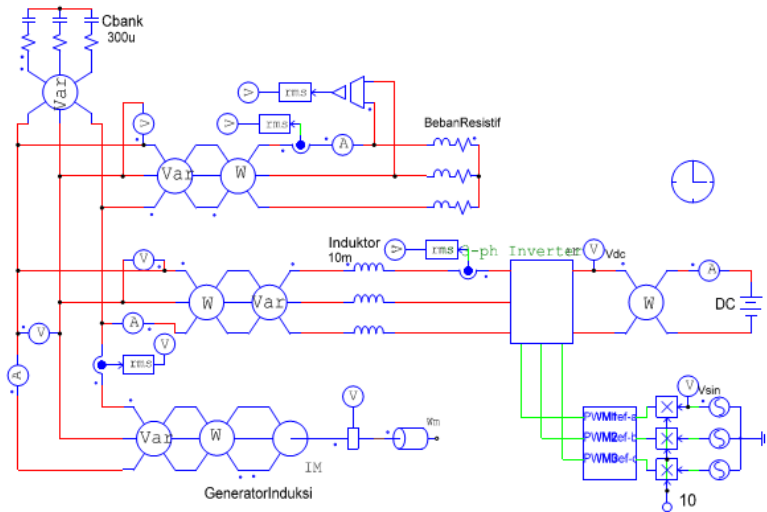
3.3 Simulasi

Simulasi dibuat dalam dua sistem yaitu *close-loop* dan *open-loop*. Simulasi *close-loop* pada Gambar 3.2 digunakan untuk mengetahui bagaimana performansi dari inverter pada sistem yang terkontrol. Sehingga dapat diamati dan dianalisa hasil dari simulasi sistem yaitu bagaimana kontrol tegangan dan frekuensi pada inverter serta aliran dayanya.



Gambar 3.2 Simulasi *Close-Loop*

Variabel yang digunakan pada simulasi close loop adalah adalah penambahan beban, sehingga dapat diamati bagaimana kondisi tegangan, frekuensi, dan aliran daya pada sistem. Sedangkan simulasi open-loop dimodelkan pada Gambar 3.3.

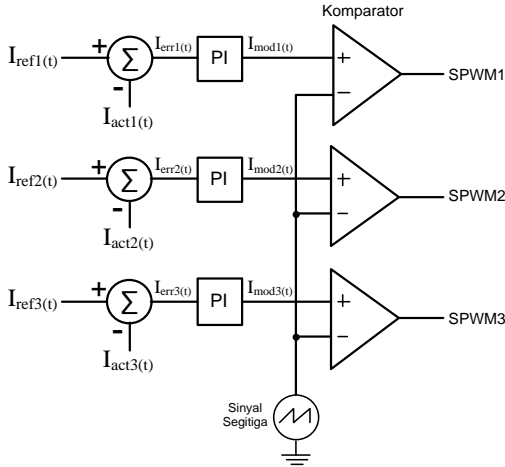


Gambar 3.3 Simulasi *Open-Loop*

Simulasi *open-loop* digunakan untuk membandingkan hasil simulasi tersebut dengan hasil implementasi. Hasil yang dibandingkan adalah bentuk gelombang dan aliran daya pada sistem.

3.3.1 Desain *Current-Controlled VSI 3 Fasa*

Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, bahwa *current-controlled* digunakan untuk mengatur arus output inverter sesuai nilai referensi yang diberikan. Metode yang digunakan adalah *linear current-controlled PWM*. Proses dari metode ini yaitu dengan membandingkan sinyal arus output inverter sebagai sinyal *actual* dengan sinyal referensi arus dari kontrol tegangan. Hasil dari proses tersebut berupa sinyal *error* yang selanjutnya masuk ke dalam tiga kontroler PI seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 *Current-Controlled PWM*

Sinyal *error* tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_{err}(t) = I_{ref}(t) - I_{act}(t) \quad (3.3)$$

I_{err} = Sinyal *error* arus

I_{ref} = Arus referensi

I_{act} = Arus inverter yang terukur

Sinyal *error* ini dikelola oleh kontroler PI dengan rumusan:

$$I_{mod}(t) = K_p \cdot I_{err}(t) + K_i \int_0^t I_{err}(t) dt \quad (3.4)$$

I_{mod} = Sinyal input modulasi

K_p = Konstanta *proportional current-controlled*

K_i = Konstanta *integral current-controlled*

t = Waktu atau waktu sesaat (menyatakan persamaan kontinu)

Hasil sinyal output dari PI berupa sinyal input modulasi sebagai sinyal referensi yang akan dimodulasikan. Modulasi dilakukan dengan membandingkan sinyal referensi sinusoidal dengan sinyal *carrier* segitiga sehingga didapatkan gelombang *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM). Besar indeks modulasi gelombang tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$m = \frac{A_{ref}}{A_{car}} \quad (3.5)$$

m = Indeks modulasi
 A_{ref} = Amplitudo referensi
 A_{car} = Amplitudo *carrier*

Hasil gelombang SPWM akan digunakan untuk pensaklaran pada inverter yang berfungsi untuk mengubah gelombang AC menjadi DC an sebaliknya. Indeks modulasi SPWM akan mempengaruhi besarnya tegangan output inverter seperti pada persamaan 3.6.

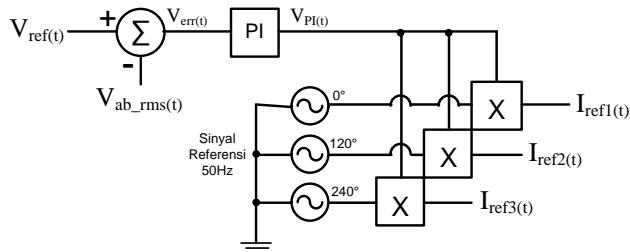
$$V_{LL(rms)} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_{DC} \quad (3.6)$$

V_{LL} = Tegangan AC *line-to-line*
 V_{DC} = Tegangan DC

Persamaan di atas adalah persamaan yang digunakan pada sistem tiga fasa. Dari persamaan tersebut tegangan DC yang digunakan harus lebih besar dari tegangan di sisi AC.

3.3.2 Desain Kontrol Tegangan Generator

Tegangan output generator bergantung pada besarnya arus reaktif inverter yang disuplai ke generator. Untuk menjaga tegangan output generator tetap konstan arus output inverter harus dijaga konstan. Proses dari kontrol tegangan ini adalah dengan mengambil nilai tegangan rms sistem yang kemudian akan dibandingkan dengan tegangan referensi yang diberikan seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Desain Kontrol Tegangan

Output dari perbandingan tersebut adalah sinyal *error* tegangan. Sinyal *error* tersebut dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$V_{err}(t) = V_{ref}(t) - V_{ab_rms}(t) \quad (3.7)$$

V_{err} = Sinyal *error* tegangan

V_{ref} = Arus referensi

V_{ab_rms} = Arus inverter yang terukur

Kemudian sinyal *error* ini dikelola oleh kontroler PI dengan rumusan:

$$V_{PI}(t) = K_p \cdot V_{err}(t) + K_i \int_0^t V_{err}(t) dt \quad (3.8)$$

V_{PI} = Sinyal tegangan output PI

K_p = Konstanta *proportional current-controlled*

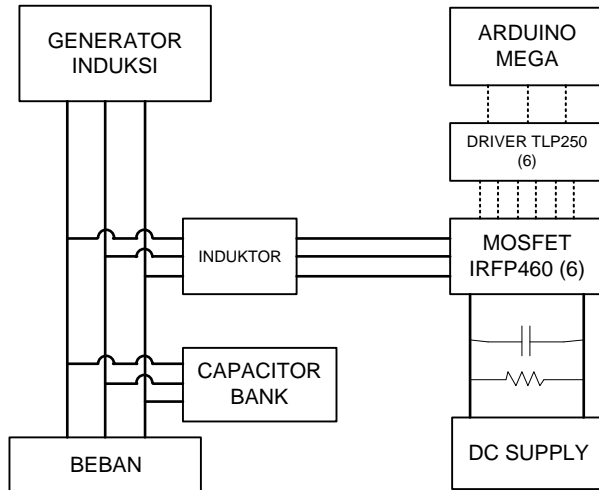
K_i = Konstanta *integral current-controlled*

t = Waktu atau waktu sesaat (menyatakan persamaan kontinu)

Hasil sinyal output dari kontroler PI kemudian dikalikan dengan tiga buah sinyal referensi 50Hz yang berbentuk sinusoidal dan berbeda fasa 120° . Tujuannya adalah untuk menjadikan sinyal berbentuk sinusoidal sebagai sinyal referensi arus sehingga dapat dibandingkan dengan sinyal arus *actual*.

3.4 Model Implementasi Sistem

Dalam implementasi, pengujian yang dilakukan adalah dengan metode *open loop*. VSI dalam implementasi terdiri dari inverter, driver, dan mikrokontroler untuk membangkitkan sinyal SPWM. Rangkaian yang digunakan dalam sistem ini dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Model Implementasi Sistem

Pada implementasi terdapat resistor dan kapasitor pada sisi DC. Hal tersebut dikarenakan saat implementasi alat tidak menggunakan baterai melainkan menggunakan DC supply. Resistor dan kapasitor pada sisi DC berguna untuk menghambat arus masuk ke DC supply agar tidak rusak.

3.5 Implementasi Generator Induksi

Generator induksi yang digunakan adalah mesin induksi dengan parameter yang telah dijelaskan pada Bab 3.2. Mesin ini dikopel dengan mesin induksi yang sama jenisnya sebelum dibelit ulang seperti pada gambar berikut:



Gambar 3.7 Implementasi Generator Induksi

Mesin induksi yang mengkopel diputar oleh *variable frequency drive* (VFD) agar dapat diatur kecepatan putarnya.



Gambar 3.8 Variable Frequency Drive

VFD mengatur kecepatan dengan memberikan input frekuensi pada mesin. Input frekuensi maksimal yang dapat diberikan adalah 60Hz dengan kecepatan mesin mencapai 1785.8 rpm.

3.6 Inverter Tiga Fasa

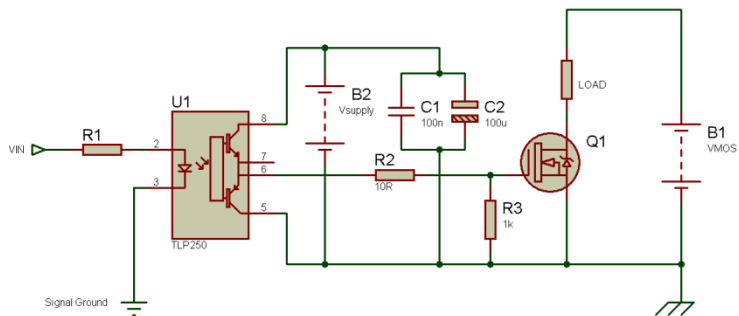
Komponen pensaklaran pada inverter adalah dengan menggunakan 6 buah MOSFET. MOSFET yang digunakan adalah tipe IRFP460 dengan spesifikasi $V_{DS} = 500V$, $I_D = 20A$, $V_{GS} \pm 20V$. Sedangkan untuk kecepatan switchingnya adalah mencapai frekuensi 9 Mhz. Gambar 3.9 adalah hasil implementasi inverter tiga fasa.



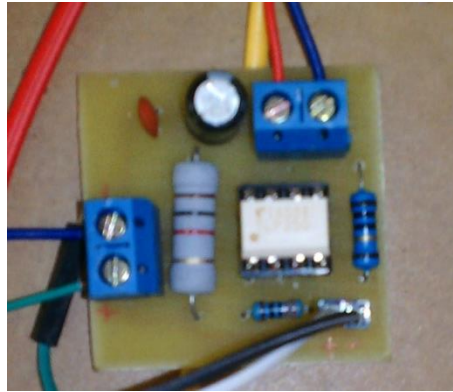
Gambar 3.9 Implementasi Inverter Tiga fasa

3.7 Rangkaian Driver

Rangkaian driver adalah rangkaian yang secara langsung memberikan trigger ke MOSFET. Pada implementasi ini digunakan IC TLP250 sebagai rangkaian driver. Berikut adalah gambar rangkaian dan hasil implementasinya:



(a)



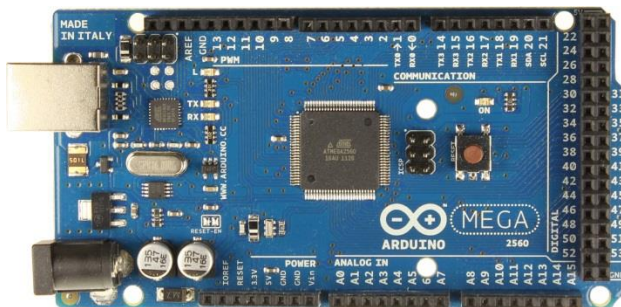
(b)

Gambar 3.10 (a) Skema Rangkaian TLP250 (b) Implementasi Driver

Selain sebagai driver, rangkaian ini merupakan bagian pemisah antara tegangan tinggi dan tegangan rendah, sehingga arus inverter tidak mengalir ke rangkaian mikrokontroler. Karena jika hal tersebut terjadi maka mikrokontroler akan rusak.

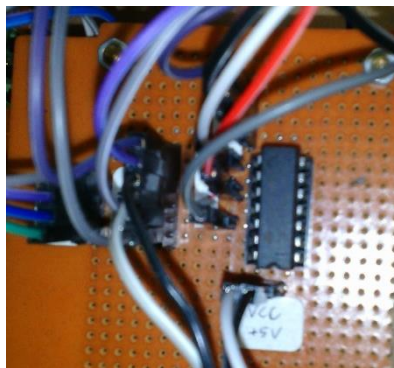
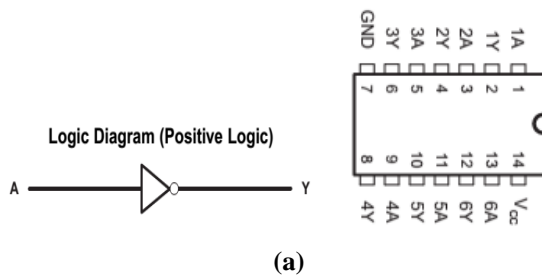
3.8 Pembangkit *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM)

Rangkaian mikrokontroler disini bertugas menghasilkan sinyal SPWM untuk *switching* MOSFET. Pada tugas akhir ini digunakan mikrokontroler Arduino MEGA 2560.



Gambar 3.11 Arduino Mega 2560

Metode untuk mengatur kondisi pensaklaran dalam sistem ini digunakan metode *linear current controlled PWM*. Dalam implementasi metode current control yang dilakukan tidak closed loop melainkan open loop. Jadi pengaturan frekuensi dan indeks modulasi dilakukan pada kode Arduino. Sinyal sinusoidal input akan dimodulasikan dengan sinyal segitiga untuk membangkitkan sinyal SPWM yang digunakan untuk pensaklaran inverter 3 fasa. Arduino difungsikan untuk membangkitkan tiga output sinyal SPWM. Kemudian dari mikrokontroler selanjutnya diteruskan ke rangkaian driver TLP250 dan IC NOT untuk diinvert.

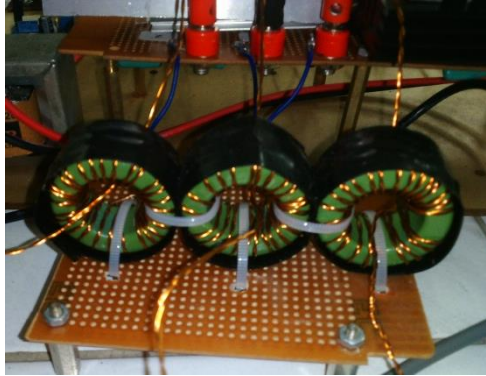


Gambar 3.12 (a) NOT GATE dan Konfigurasi IC (b) Implementasi IC

Enam buah sinyal output SPWM digunakan untuk pensaklaran masing-masing MOSFET sehingga inverter dapat berfungsi mengubah input DC menjadi AC tiga fasa.

3.9 Implementasi Induktor dan Kapasitor

Induktor berfungsi sebagai filter arus output inverter yang menuju ke sistem. Induktor dipasang seri pada output inverter. Berikut adalah implementasi induktor yang digunakan:



Gambar 3.13 Induktor Tiga Fasa

Nilai induktor yang digunakan adalah 10 mH. Nilai tersebut didapatkan dengan rumus sebagai berikut:

$$X_L = \frac{\sqrt{3} * V_{dc} * V_L}{2 * P} \quad (3.9)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad (3.10)$$

X_L = Reaktansi induktif (ohm)

V_{DC} = Tegangan DC (V)

V_L = Tegangan line AC (V)

P = Daya aktif (Watt)

L = Induktansi (H)

ω = Omega ($2\pi f$)

Kapasitor berfungsi untuk memfilter tegangan yang dipasang pada sistem secara paralel. Selain berfungsi memfilter tegangan, kapasitor juga berfungsi untuk menghasilkan daya reaktif sehingga memperringan kerja inverter sebagai penyuplai daya reaktif utama. Kapasitor yang digunakan memiliki spesifikasi tegangan 250 V AC yang masing-

masing bernilai 100 uF. Berikut adalah gambar implementasi kapasitor tiga fasa:



Gambar 3.14 Implementasi Kapasitor Tiga Fasa

Pada implementasi, digunakan sembilan buah kapasitor yang dipasang paralel menjadi tiga yang kemudian dirangkai wye. Jadi, kapasitor tiga fasa yang terpasang berkapasitas 300 uF untuk setiap fasanya. Nilai tersebut diperoleh dari perhitungan dan nilai kapasitor yang tersedia.

$$X_M = X_C \quad (3.11)$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} \quad (3.12)$$

X_M = Reaktansi magnetisasi generator (ohm)

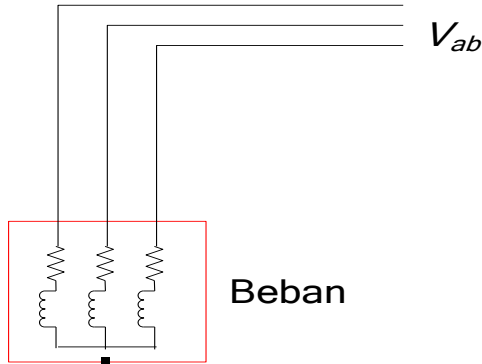
X_C = Reaktansi kapasitif (ohm)

C = Kapasitansi (F)

ω = Omega ($2\pi f$)

3.10 Implementasi Beban

Beban yang digunakan dalam simulasi adalah beban 3 fasa linear dan seimbang. Beban yang digunakan dalam simulasi hanya beban yang bersifat resistif. Beban dikoneksikan wye, dapat dilihat pada Gambar 3.15 di bawah:



Gambar 3.15 Model Beban Sistem

Besarnya daya yang diserap beban dapat dirumuskan:

$$I_L = \frac{V_{LN}}{R} \quad (3.13)$$

$$V_{LN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} \quad (3.14)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I_L \cdot \cos \phi \quad (3.15)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot R} \cdot \cos \phi \quad (3.16)$$

$$P = \frac{V_{LL}^2}{R} \cos \phi \quad (3.17)$$

- P = Daya aktif (W)
- R = Resistansi (ohm)
- I_L = Arus line (A)
- V_{LL} = Tegangan *line-to-line* (V)
- V_{LN} = Tegangan *line-to-neutral* (V)
- $\cos \phi$ = Faktor daya

Gambar 3.16 adalah beban yang digunakan dalam implementasi yaitu tiga buah Rheostat atau biasa disebut resistor geser yang dihubungkan wye.



Gambar 3.16 Beban Resistif Tiga Fasa

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB IV

Hasil Simulasi, Implementasi, dan Analisis Data

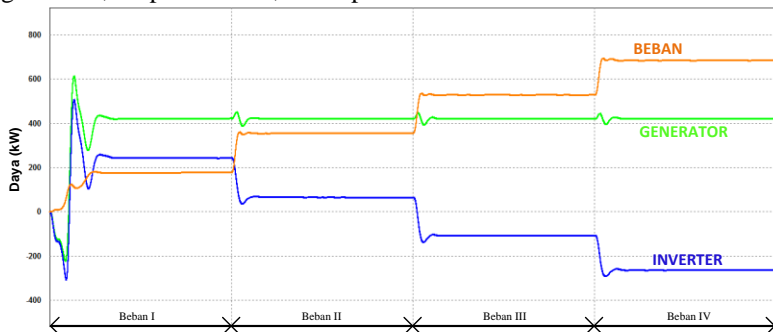
Pembahasan mengenai pengujian dan analisis data akan disampaikan dalam bab ini. Pengujian dilakukan untuk menganalisis operasi generator induksi saat kondisi menyuplai beban. Beban yang digunakan adalah beban resistif.

4.1 Hasil Simulasi

Hasil simulasi pada bab ini adalah hasil dari simulasi *close-loop*. Hasil yang dianalisa adalah bagaimana aliran daya, kontrol tegangan, dan frekuensi bekerja saat ada penambahan beban.

4.1.1 Aliran Daya pada Kondisi Perubahan Beban

Analisa dilakukan dengan penambahan beban pada sistem dan mengamati aliran dayanya. Daya yang diamati adalah output dari generator, output inverter, dan input ke beban.

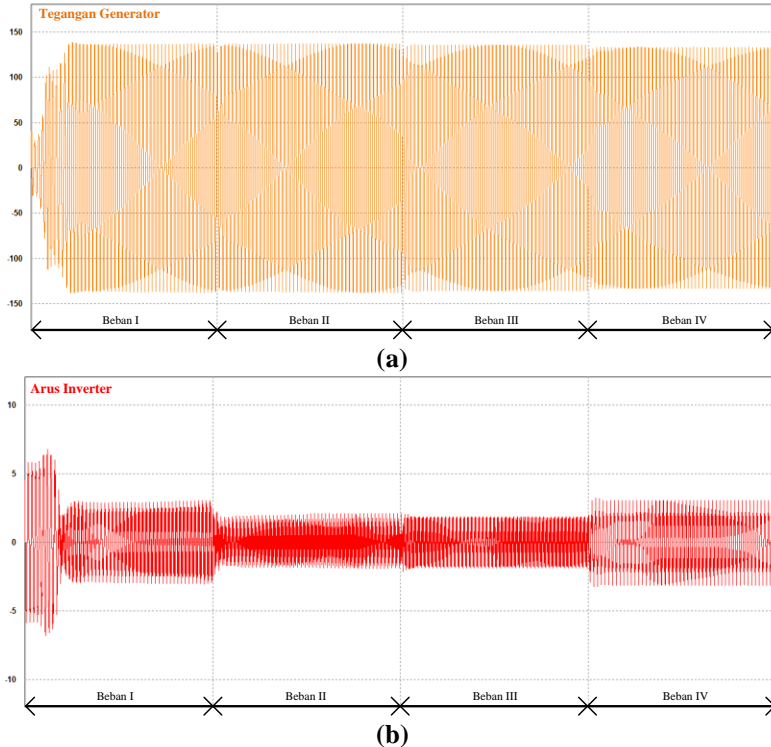


Gambar 4.1 Aliran Daya dengan Penambahan Beban

Gambar 4.1 merupakan bagaimana aliran daya pada sistem saat mengalami penambahan beban. Saat beban bertambah daya yang diserap oleh beban akan bertambah sedangkan daya pada generator konstan, sehingga inverter akan menyuplai daya menuju beban untuk menjaga daya pada sistem konstan.

4.1.2 Kontrol Tegangan

Tujuan dari kontrol tegangan yaitu menjaga tegangan pada sistem konstan sesuai referensi yang diberikan dengan mengatur arus output dari inverter.

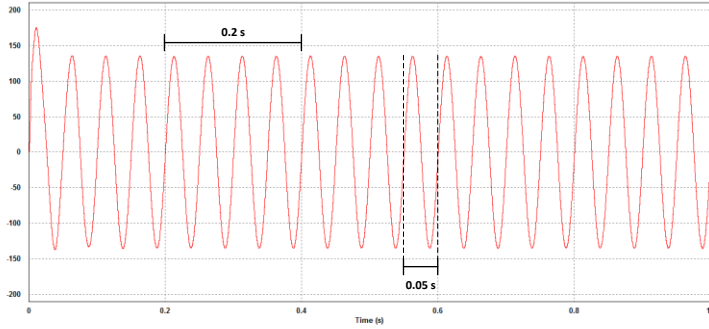


Gambar 4.2 (a) Tegangan Sistem (b) Arus Inverter

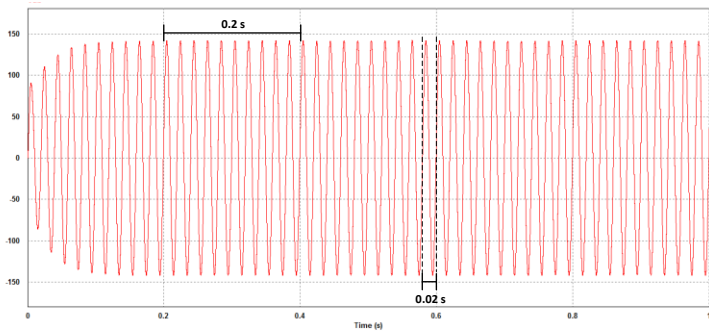
Gambar 4.2 adalah gelombang tegangan pada sistem dan arus output inverter. Tegangan pada sistem konstan dan arus output inverter akan mengalami perubahan. Hal ini dikarenakan kontrol berfungsi untuk menjaga tegangan pada sistem konstan dengan cara mengontrol arus output inverternya untuk menjaga daya pada sistem konstan. Dengan begitu daya pada inverter akan bergerak dua arah.

4.1.3 Kontrol Frekuensi

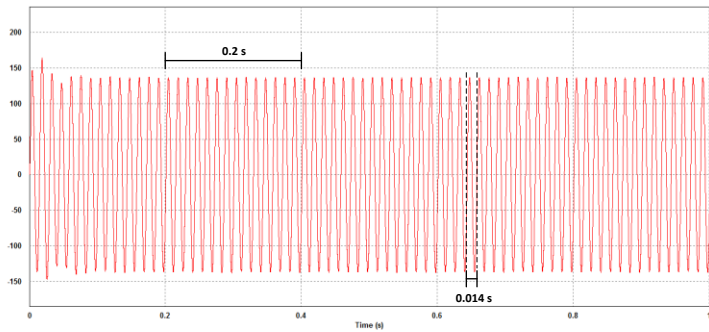
Perubahan frekuensi diamati untuk mengetahui bagaimana kontrol frekuensi bekerja. Analisa pertama dilakukan pada pengamatan tegangan sistem dengan mengubah frekuensi sinyal referensi inverter.



(a)



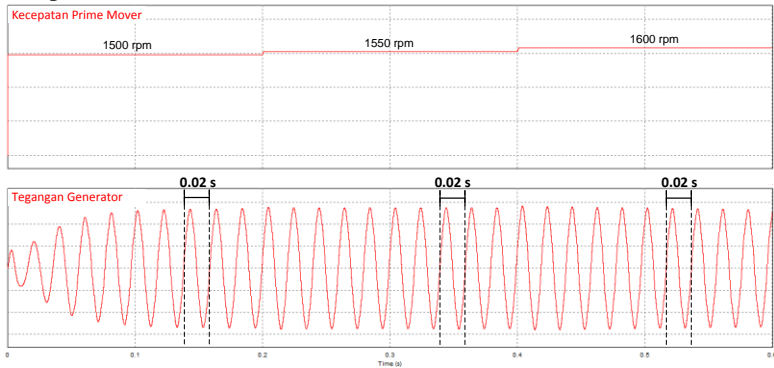
(b)



(c)

Gambar 4.3 (a) Frekuensi 20Hz (b) Frekuensi 50Hz (c) Frekuensi 70Hz

Pada pengaturan frekuensi, gelombang akan mengikuti frekuensi yang diberikan oleh sinyal referensi dari inverter. Hal tersebut dikarenakan pada stator mesin terbentuk medan putar dengan kecepatan sinkron sesuai dengan frekuensi daya reaktif yang diinputkan. Kontrol frekuensi disimulasikan pada Gambar 4.4 dengan adanya perubahan kecepatan.



Gambar 4.4 Kontrol Frekuensi pada Perubahan Kecepatan

Dapat dilihat pada gelombang tegangan tidak ada perubahan kerapatan gelombang. Walaupun dengan adanya perubahan kecepatan pada prime mover, frekuensi pada sistem dijaga konstan dengan adanya inverter.

4.2 Hasil Implementasi

Hasil implementasi didapatkan dengan melakukan pengujian VSI yang telah dibuat. Hasil dari implementasi tersebut juga dibandingkan dengan hasil simulasi *open-loop*. Hasil yang dibandingkan adalah bentuk gelombang dan aliran daya pada sistem.

4.2.1 Pengujian Sinyal SPWM

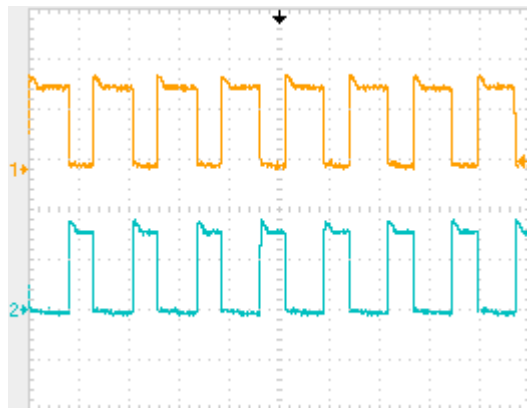
Pengujian sinyal SPWM dilakukan agar saat sinyal digunakan untuk pensaklaran MOSFET tidak terjadi kesalahan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan osiloskop digital. Sinyal yang diamati adalah sinyal SPWM output mikrokontroler, sinyal output driver, dan sinyal hasil *inverting*.

Sinyal SPWM dihasilkan oleh Arduino sebagai mikrokontroler. Frekuensi sinyal SPWM yang digunakan adalah sebesar 3.9 kHz diambil dari prescaler yang ada pada Arduino. Frekuensi untuk output inverter juga dapat diatur di dalam kode Arduino pada Lampiran 1.



Gambar 4.5 Sinyal SPWM

Dari tiga buah sinyal SPWM tersebut, dibuat menjadi enam buah sinyal dan tiga diantaranya dimasukkan ke gerbang NOT untuk diinvert. Proses inverting yaitu mengubah nilai PWM dari *on* menjadi *off* dan sebaliknya.



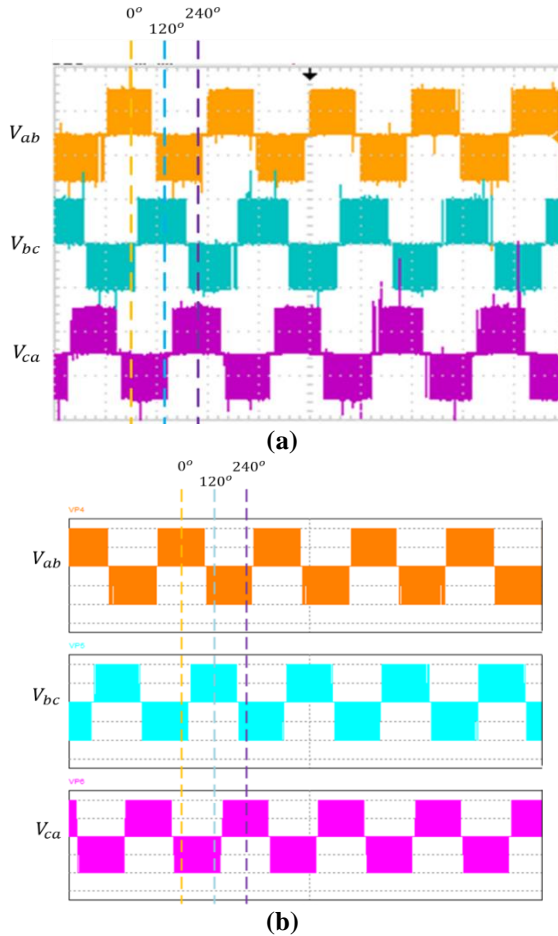
Gambar 4.6 Output *Inverting* SPWM

Enam sinyal tersebut kemudian masuk ke rangkaian driver untuk dinaikkan tegangannya agar dapat men-trigger MOSFET. Sinyal yang tidak diinvert masuk ke MOSFET 1, 3, dan 5. Sedangkan sinyal yang diinvert masuk ke MOSFET 2, 4, dan 6. Sinyal ini dibentuk Arduino

dengan cara memanggil tabel angka pada kode. Tabel angka tersebut membentuk jajaran *duty cycle* sehingga terbentuklah sinyal PWM.

4.2.2 Pengujian CC-VSI Tanpa Beban

Pengujian ini dilakukan untuk melihat performa inverter tiga fasa. Pengujian tanpa beban dengan memberikan input DC ke dalam inverter dan melihat bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan. Gambar 4.7 merupakan output tegangan inverter tiga fasa.



Gambar 4.7 Tegangan Output Inverter: (a) Hasil Implementasi
(b) Hasil Simulasi

Gambar 4.7 (a) adalah pengujian tanpa beban hasil implementasi. Sedangkan Gambar 4.7 (b) adalah gelombang tegangan inverter hasil simulasi. Bentuk gelombang hasil implementasi dan simulasi adalah sama yaitu gelombang kotak AC tiga fasa.

Kemudian dilakukan analisa amplitudo tegangan hasil implementasi dan hasil perhitungan manual. Berikut adalah bentuk gelombang tegangan *line-to-line* pada inverter pada tegangan input DC 10 volt dan indeks modulasi 1.



Gambar 4.8 Gelombang Tegangan Output Inverter

Nilai tegangan *peak-to-peak* pada Gambar 4.8 adalah 21 V, maka nilai rmsnya adalah:

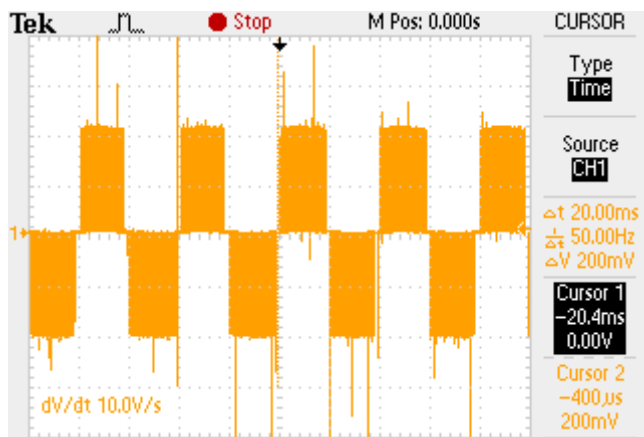
$$V_{rms} = \frac{V_{PP}}{2\sqrt{2}} = \frac{21}{2\sqrt{2}} = 7.424 \text{ V}$$

Nilai tersebut dapat dibuktikan melalui persamaan tegangan output inverter. Tegangan output inverter dipengaruhi oleh tegangan DC input dan indeks modulasi dari sinyal SPWM. Maka, nilai tegangan *line-to-line* output inverter dapat dihitung dengan persamaan berikut:

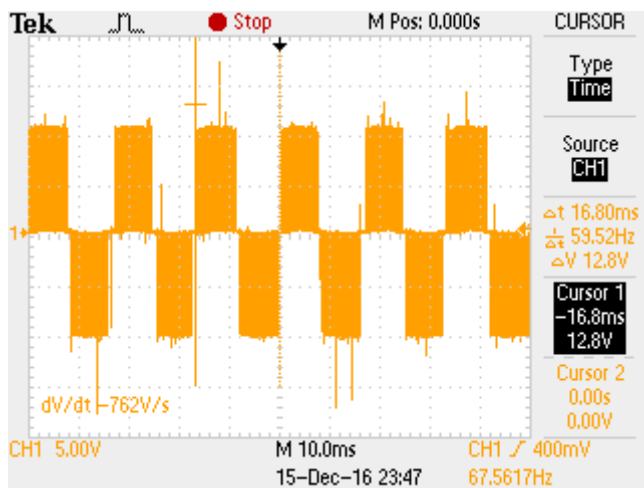
$$V_{LL(rms)} = m \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot V_{DC} = 1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot 10 = 6.123 \text{ V}$$

Hasil pengujian lebih besar dibandingkan dengan hasil perhitungan. Adanya kenaikan tegangan akibat proses pensaklaran yang

tidak sempurna karena adanya *spike* gelombang. Pengujian juga dilakukan dengan mengubah nilai frekuensi input sinyal referensi. Sinyal frekuensi yang diberikan adalah 50 Hz dan 60 Hz. Berikut adalah hasil pengujian saat mengubah nilai frekuensi:



(a)



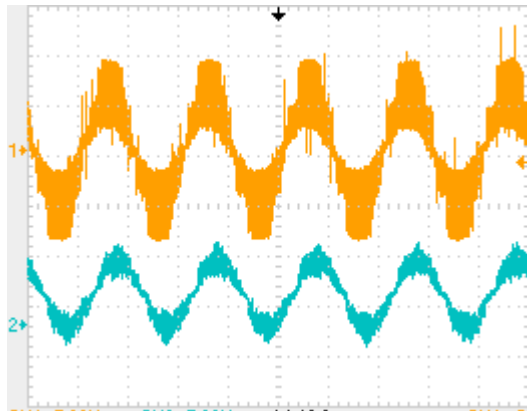
(b)

Gambar 4.9 Gelombang Tegangan Output Inverter: (a) Frekuensi 50 Hz; (b) Frekuensi 60 Hz

Frekuensi yang dapat diatur pada mikrokontroler adalah frekuensi SPWM dan frekuensi per *cyclenya*. Frekuensi SPWM akan mempengaruhi kecepatan pensaklaran pada MOSFET. Hal tersebut akan berpengaruh ke bentuk gelombang output dari inverter. Semakin besar kecepatan pensaklaran, maka akan semakin halus bentuk gelombang yang dihasilkan. Sedangkan untuk frekuensi *cycle* SPWM akan berpengaruh ke frekuensi output AC.

4.2.3 Pengujian CC-VSI Beban Resistif

Selanjutnya adalah pengujian inverter dengan beban resistif. Beban yang digunakan adalah tiga buah Rheostat dengan resistansi 10 ohm. Pengujian ini dilakukan untuk melihat bentuk gelombang tegangan dan arus output inverter. Pengujian ini dilakukan dalam dua kondisi yaitu dengan filter L dan filter LC. Induktor sebagai filter arus dipasang seri pada output inverter. Kapasitor sebagai filter tegangan dipasang paralel dan dikoneksikan wye.



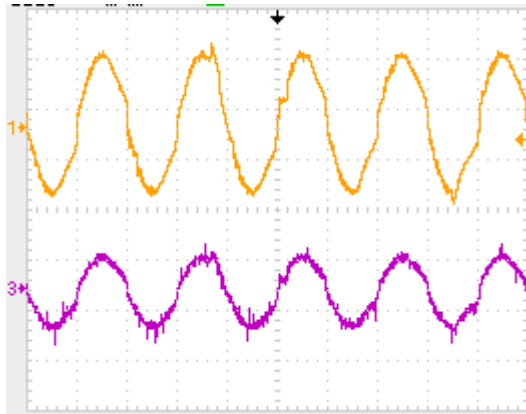
Gambar 4.10 Gelombang Output Inverter dengan Filter L

Induktor dipasang seri di sisi output inverter. Fungsi induktor adalah sebagai filter arus masuk ke terminal sistem. Nilai induktor yang digunakan adalah 10 mH. Nilai tersebut diperoleh melalui hubungan antara tegangan line, tegangan DC, dan daya pada sistem.

$$X_L = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{dc} \cdot V_L}{2 \cdot P} = \frac{\sqrt{3} \cdot 138 \cdot 106}{2 \cdot 417} = 30,379 \text{ ohm}$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{30,379}{2\pi \cdot 50} = 0.0967 \text{ H}$$

Didapatkan nilai induktor sebesar 9.67 mH. Nilai V_{DC} , V_L , dan P diperoleh dari simulasi sistem dan nilai induktor tersebut dapat digunakan pada program simulasi. Tetapi pada implementasi, nilai belitan induktor adalah 10 mH. Hal tersebut dikarenakan belitan induktor tidak bisa sama dengan nilai tersebut sehingga nilai yang digunakan adalah nilai yang dekat tetapi lebih besar.



Gambar 4.11 Gelombang Output Inverter dengan Filter LC

Fungsi kapasitor adalah sebagai filter tegangan dan membantu inverter untuk menyuplai daya reaktif ke generator saat dibutuhkan. Nilai kapasitor yang digunakan adalah 300 μF . Nilai tersebut didapatkan dari perhitungan dengan nilai reaktansi magnetisasi generator.

$$X_M = X_C = 12.3771$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 12.3771} = 257.176 \mu\text{F}$$

Nilai tersebut merupakan nilai kapasitansi minimal yang dibutuhkan generator untuk dapat eksitasi pada sistem generator induksi eksitasi sendiri. Tetapi pada implementasi kapasitor berfungsi untuk filter dan penyuplai eksitasi tambahan dikarenakan eksitasi utama sistem adalah dari inverter.

4.2.4 Pengujian CC-VSI dan Generator dengan Perubahan Kecepatan

Generator induksi adalah mesin induksi yang dikopel dengan mesin induksi lain yang dikontrol dengan menggunakan *variable frequency drive* (VFD) untuk mengatur kecepatan putaran mesin. Mesin diputar melebihi kecepatan sinkronnya yaitu 1500 rpm yang didapatkan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}n_{sync} &= \frac{120f}{p} \\n_{sync} &= \frac{120(50)}{4} \\n_{sync} &= 1500 \text{ rpm}\end{aligned}$$

Oleh karena itu mesin diputar di atas kecepatan sinkronnya agar mesin dapat beroperasi sebagai generator. Jika mesin diputar semakin cepat, maka slip akan membesar sehingga memperbesar torsi mesin. Hal tersebut menyebabkan daya yang dihasilkan generator juga akan bertambah besar.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui aliran daya generator dan inverter. Pada pengujian ini, yang menjadi variabel adalah kecepatan putar mesin. Cara pengujian yaitu pertama dengan memutar mesin sampai pada kecepatan sinkronnya. Kemudian memasukkan input tegangan DC pada inverter untuk memberikan eksitasi pada generator induksi. Tegangan yang digunakan untuk pengujian adalah 15 V, 20 V, 30 V, 40 V, dan 50 V. Setelah tegangan DC dimasukkan, kecepatan dinaikkan dengan mengatur frekuensi pada VFD untuk melihat aliran daya generator dan inverter. Frekuensi VFD yang digunakan untuk pengujian adalah 50 Hz, 51 Hz, 52 Hz, 53 Hz, 54 Hz, dan 55 Hz. Beban yang digunakan dibuat besar yaitu Rheostat tiga fasa 5 ohm agar sebagian besar daya mengalir ke arah beban. Berikut adalah tabel hasil pengujian:

Tabel 4.1 Pengujian pada Tegangan 15V

Frekuensi	Kecepatan	V_{DC}	I_{DC}	V_{AC}	I_{INV}
50	1489.7	15	1.23	6.5	1
51	1522.5	15	0.83	7.06	0.78
52	1548.7	15	0.6	7.63	0.65
53	1580.3	15	0.44	8.21	0.66
54	1611	15.2	0.37	9.23	0.98
55	1638.2	19.7	0.44	13.3	1.94

Tabel 4.2 Pengujian pada Tegangan 20V

Frekuensi	Kecepatan	V_{DC}	I_{DC}	V_{AC}	I_{INV}
50	1489.7	20	1.7	10	1.47
51	1522.5	20	1.33	10.5	1.09
52	1548.7	20	0.9	10.98	0.86
53	1580.3	20	0.48	11.49	0.88
54	1611	20	0.14	11.91	1.21
55	1638.2	24.7	0.01	15.38	1.88

Tabel 4.3 Pengujian pada Tegangan 30V

Frekuensi	Kecepatan	V_{DC}	I_{DC}	V_{AC}	I_{INV}
50	1489.7	30	2.74	15.4	2.28
51	1522.5	30	2.12	15.94	1.76
52	1548.7	30	1.5	16.62	1.37
53	1580.3	30	1	17.24	1.28
54	1611	30	0.6	17.64	1.47
55	1638.2	30	0.2	18.09	1.93

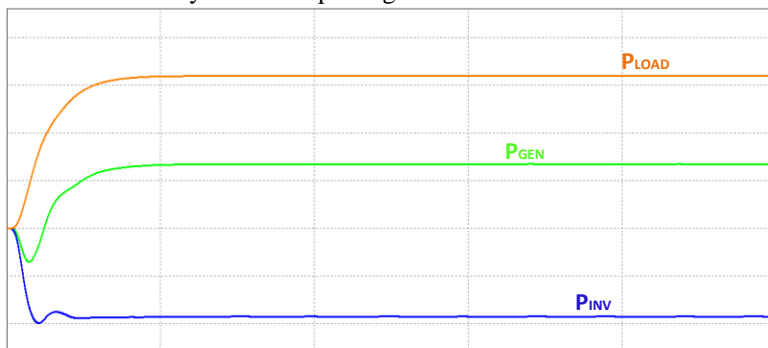
Tabel 4.4 Pengujian pada Tegangan 40V

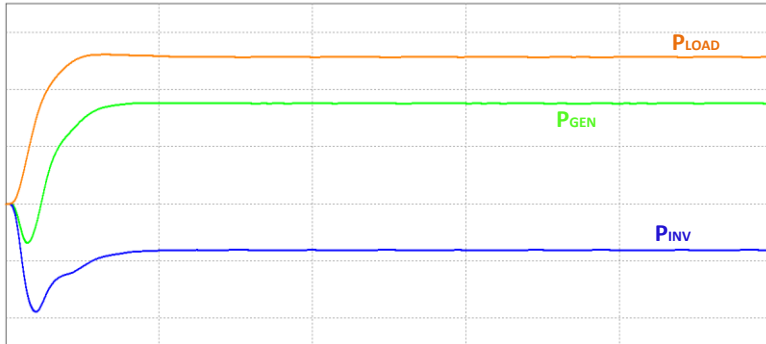
Frekuensi	Kecepatan	V_{DC}	I_{DC}	V_{AC}	I_{INV}
50	1489.7	40	3.7	20.64	3.02
51	1522.5	40	2.9	21.33	2.4
52	1548.7	40	2.3	22	2
53	1580.3	40	1.7	22.6	1.76
54	1611	40	1.32	23.04	1.8
55	1638.2	40	0.82	23.64	2.07

Tabel 4.5 Pengujian pada Tegangan 50V

Frekuensi	Kecepatan	V_{DC}	I_{DC}	V_{AC}	I_{INV}
50	1489.7	50	4.6	25.63	3.71
51	1522.5	50	3.88	26.14	3.17
52	1548.7	50	3.21	27.08	2.7
53	1580.3	50	2.71	27.86	2.44
54	1611	50	2.2	28.5	2.28
55	1638.2	50	1.86	28.6	2.36

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa semakin besar kecepatan yang diberikan ke generator, arus di sisi DC semakin turun pada tegangan yang tetap. Hal tersebut dikarenakan semakin cepat putaran, semakin besar daya yang dihasilkan generator sehingga aliran daya dari inverter ke beban berkurang. Gambar 4.12 memperlihatkan hasil simulasi aliran daya saat kecepatan generator diubah.

**(a)**



(b)

Gambar 4.12 Simulasi Perubahan Kecepatan Generator Induksi: (a) 1580.3 rpm; (b) 1638.2 rpm

Gambar 4.12 memperlihatkan hasil simulasi saat kecepatan generator dinaikkan. Daya pada sistem dijaga konstan oleh inverter sehingga saat daya generator melebihi daya yang dibutuhkan beban, daya yang masuk inverter meningkat.

Pada sistem di sisi DC terdapat dummy load untuk membuang daya agar pada saat daya generator masuk ke inverter DC supply tidak teraliri arus. Oleh karena itu, saat inverter menyuplai beban terdapat arus yang masuk ke dalam *dummy load*.

Tabel 4.6 Arus Dummy Load

Tegangan DC	Arus DC
15 V	0.14 A
20 V	0.18 A
30 V	0.28 A
40 V	0.37 A
50 V	0.46 A

Arus tersebut diukur pada beban di sisi DC dengan memutuskan hubungan suplai DC dengan inverter kemudian diberi tegangan. Berarti

arus output DC menuju inverter adalah selisih dari arus DC pada Tabel 4.1-4.5 dan arus pada Tabel 4.6.

Analisis selanjutnya adalah pada Tabel 4.1-4.5 terdapat sedikit perubahan tegangan suplai DC. Misalkan pada data tegangan 15 V dengan frekuensi 55 Hz tegangan DC berubah menjadi 19.7 V. Hal tersebut dikarenakan adanya kenaikan tegangan sistem yang melebihi tegangan *line-to-line* pada indeks modulasi sinyal SPWM yang bernilai 1. Permasalahan tersebut dapat dibuktikan dengan perhitungan berikut:

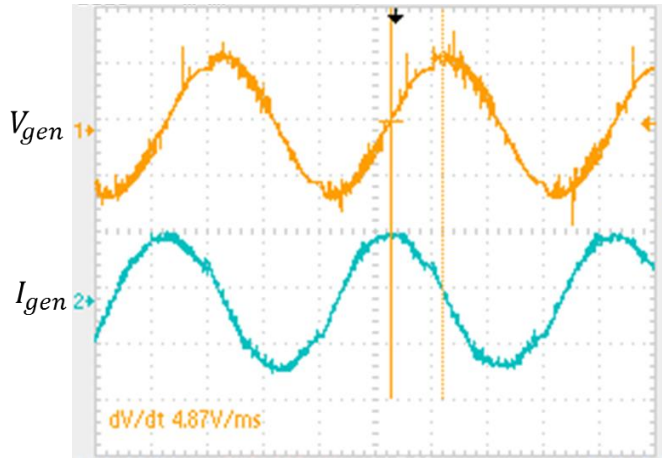
$$m = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot V_{DC}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 13.3}{\sqrt{3} \cdot 15} = 1.447$$

Pada tegangan sistem 9.64 V nilai indeks modulasinya melebihi nilai dari indeks modulasi pensaklaran inverter. Hal tersebut merupakan yang menyebabkan kenaikan tegangan di sisi DC mengikuti tegangan AC.

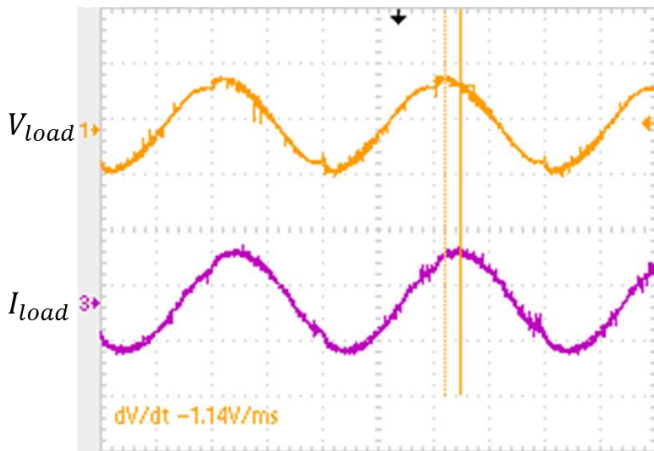
Pada Tabel 4.1-4.5 arus inverter mengalami perubahan dari turun menjadi naik. Nilai ini didapatkan dari pengukuran menggunakan amperemeter digital. Nilai tersebut merupakan nilai total arus yaitu arus aktif dan arus reaktif. Hal tersebut disebabkan karena saat kecepatan generator 1580.3 – 1638.2 rpm, inverter dalam kondisi disuplai generator. Maka arus tersebut adalah arus yang menuju ke inverter.

4.2.5 Pengujian Aliran Daya Reaktif Generator

Daya reaktif terbentuk karena arus yang mendahului tegangan atau yang biasa disebut dengan *leading*. Daya reaktif diperlukan oleh mesin induksi untuk eksitasi agar dapat berfungsi sebagai generator. Pada pengujian ini data yang paling penting adalah sudut daya yang digunakan untuk menentukan faktor daya. Faktor daya menentukan berapa besar daya dan kemana daya itu mengalir. Gambar 4.13 (a) merupakan perbandingan antara tegangan dan arus output generator saat dioperasikan pada kecepatan 1548.7 rpm. Sedangkan pada Gambar 4.13 (b) merupakan tegangan dan arus menuju ke arah beban.



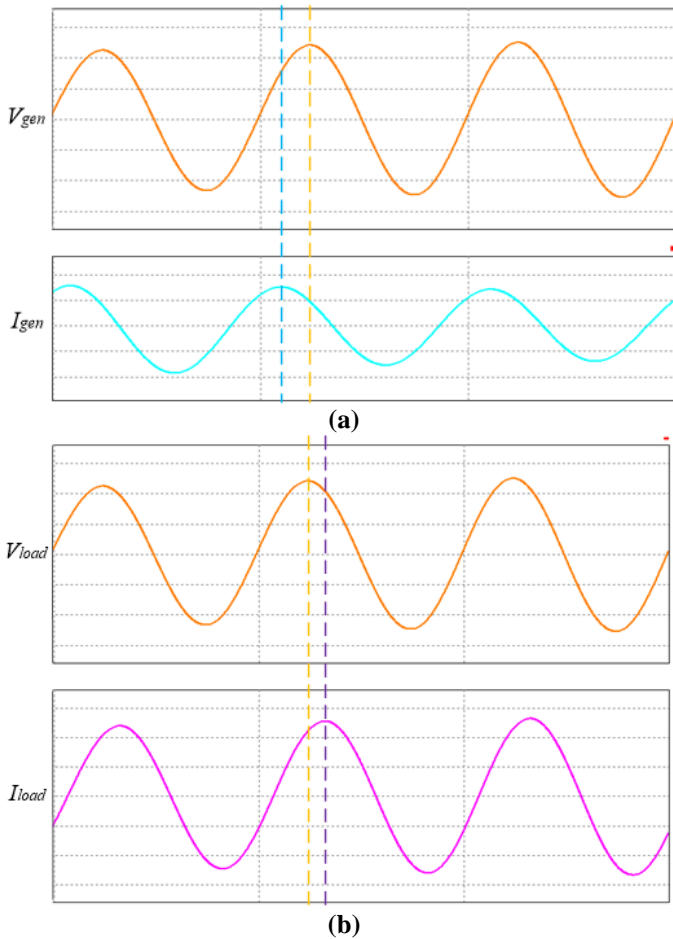
(a)



(b)

Gambar 4.13 Pengujian pada Tegangan 20V_{DC}: (a) Tegangan dan Arus Generator; (b) Tegangan dan Arus Beban

Nilai sudut daya pada Gambar 4.13 (a) dinamakan *lagging* yang berarti bersifat induktif. Sedangkan pada Gambar 4.13 (b) dinamakan *leading* yang berarti bersifat kapasitif. Hasil dari implementasi gelombang output generator juga dibandingkan dengan hasil simulasinya pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Hasil Simulasi *open-loop*: (a) Tegangan dan Arus Generator; (b) Tegangan dan Arus Beban

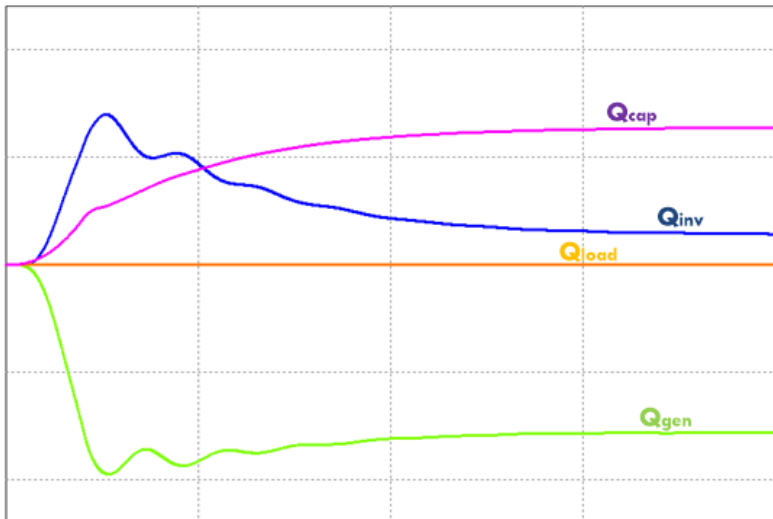
Hasil implementasi dan simulasi adalah sama yaitu memiliki arus generator *lagging* dan arus beban *leading*. Sifat-sifat tersebut biasanya dipengaruhi oleh beban atau komponen yang ada, seperti kapasitor atau induktor. Untuk menentukan daya reaktif diperlukan sudut daya tersebut. Maka dari itu dilakukan perhitungan daya reaktif pada pengujian yang direpresentasikan pada tabel berikut:

Tabel 4.7 Data Pengujian Daya Reaktif pada Tegangan 20V

Titik Pengamatan	Tegangan (V)	Arus (A)	Sin θ	Daya Reaktif (VAR)
GENERATOR	10	1.03	-0.996	-17.771
	10.5	1.14	-0.766	-15.89
	10.98	1.45	-0.622	-17.16
	11.49	1.94	-0.431	-16.658
	11.91	2.46	-0.326	-16.538
	15.38	3.46	-0.303	-27.885
INVERTER	10	1.47	0.420	10.688
	10.5	1.09	0.592	11.73
	10.98	0.86	0.902	14.75
	11.49	0.88	0.951	16.656
	11.91	1.21	0.798	19.908
	15.38	1.88	0.588	29.437
KAPASITOR	10	1.323	-0.962	22.05
	10.5	1.154	-0.941	19.75
	10.98	1.05	-0.904	18.06
	11.49	1.05	-0.930	19.43
	11.91	1.267	-0.960	25.10
	15.38	1.651	-0.991	43.59
BEBAN	10	1.117	0.498	-9.63
	10.5	1.188	0.572	-12.37
	10.98	1.235	0.524	-12.32
	11.49	1.287	0.465	-11.91
	11.91	1.346	0.453	-12.58
	15.38	1.742	0.464	-21.54

Tabel 4.7 adalah tabel hasil pengujian pada semua bagian bercabang pada sistem dengan enam sampel pada kecepatan generator yang berbeda seperti data sebelumnya. Daya reaktif Q didapatkan melalui perkalian antara tegangan *line-to-line*, arus belitan, dan sin θ . Daya reaktif yang terbangkit pada sistem merupakan penjumlahan dari daya reaktif kapasitor dan dari inverter. Sedangkan pada sisi generator

dan beban teraliri daya reaktif. Simulasi digunakan untuk dibandingkan dengan hasil pengujian pada kecepatan generator 1522.5 rpm.



Gambar 4.15 Simulasi Aliran Daya Reaktif

Dari Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa aliran daya reaktif adalah menuju generator yang disuplai dari inverter dan bank kapasitor, sedangkan beban tidak ada aliran daya reaktif karena beban bersifat resistif. Generator menyerap daya reaktif besar saat putaran generator ditambah untuk menghasilkan daya yang besar. Pada implementasi terdapat aliran daya reaktif ke beban dikarenakan sifat beban tidak resistif murni.

4.2.6 Pengujian Aliran Daya Aktif Generator

Pengujian aliran daya aktif dapat diperoleh melalui perhitungan dari data tegangan, arus, dan faktor daya pada masing-masing percabangan sistem. Diambil enam data pada masing-masing percabangan sistem. Enam data tersebut diukur pada kecepatan yang berbeda seperti pada Tabel 4.7. Tabel 4.8 menjabarkan data yang diperoleh dari pengujian pada tegangan 20V di empat titik pengamatan.

Tabel 4.8 Data Pengujian Daya Aktif pada Tegangan 20V

Titik Pengamatan	Tegangan (V)	Arus (A)	Cos θ	Daya Aktif (W)
GENERATOR	10	1.03	0.088	1.567
	10.5	1.14	0.642	13.32
	10.98	1.45	0.783	21.59
	11.49	1.94	0.902	34.830
	11.91	2.46	0.945	47.976
	15.38	3.46	0.953	87.851
INVERTER	10	1.47	0.908	23.109
	10.5	1.09	0.806	15.98
	10.98	0.86	0.431	7.06
	11.49	0.88	-0.309	-5.412
	11.91	1.21	-0.603	-15.057
	15.38	1.88	-0.809	-40.517
KAPASITOR	10	1.323	0.271	-6.22
	10.5	1.154	0.338	-7.10
	10.98	1.05	0.427	-8.52
	11.49	1.05	0.368	-7.35
	11.91	1.267	0.279	-7.29
	15.38	1.651	0.134	-5.88
BEBAN	10	1.117	0.867	-16.78
	10.5	1.188	0.820	-17.72
	10.98	1.235	0.851	-20.00
	11.49	1.287	0.885	-22.02
	11.91	1.346	0.891	-24.75
	15.38	1.742	0.886	-41.10

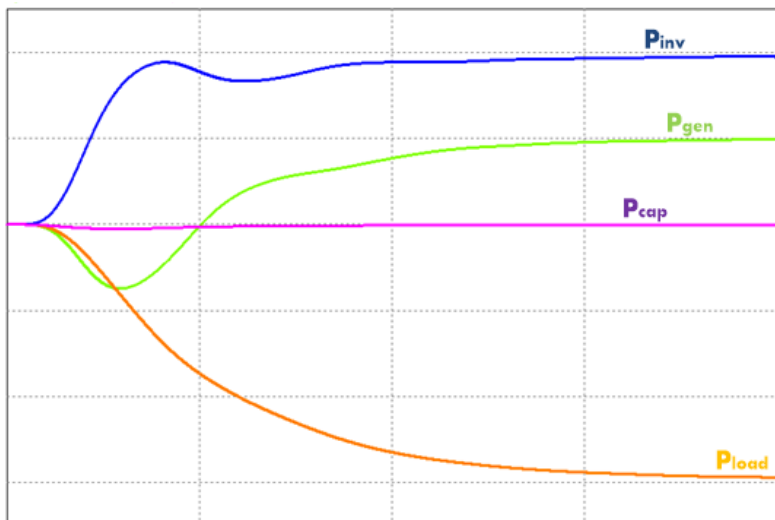
Tegangan dan arus dari Tabel 4.8 diperoleh dari pengukuran menggunakan multimeter. Sedangkan data faktor daya diperoleh dengan membandingkan gelombang pada osiloskop sehingga didapatkan sudut dayanya. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa semakin cepat putaran generator maka akan semakin besar daya yang dihasilkan. Daya yang telah dihitung dapat dibandingkan dengan membandingkan antara daya yang dihasilkan dan daya yang diserap. Daya yang dihasilkan

adalah penjumlahan dari daya generator dan daya inverter yang bernilai positif. Sedangkan daya yang diserap adalah penjumlahan dari daya kapasitor, daya beban, dan daya inverter yang bernilai negatif. Perhitungan tersebut disusun dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Perbandingan Daya Aktif pada Tegangan 20V

Daya Dihasilkan (W)	Daya Diserap (W)
24.677	-23.002
29.29	-24.81
28.64	-28.52
29.418	-29.371
32.920	-32.043
47.335	-46.979

Dari tabel di atas, terdapat selisih antara daya yang dihasilkan dan daya yang diserap. Selisih tersebut merupakan *losses* dari sistem yang disebabkan oleh impedansi kabel dan *losses* pensaklaran. Simulasi digunakan untuk dibandingkan dengan hasil pengujian pada kecepatan generator 1522.5 rpm.



Gambar 4.16 Simulasi Aliran Daya Aktif

Pada Gambar 4.16 aliran daya aktif mengalir dari generator menuju beban dan inverter. Daya aktif tidak masuk ke bank kapasitor sedangkan pada implementasi ada daya aktif yang mengalir. Hal tersebut menandakan bahwa kapasitor pada implementasi tidak murni bersifat kapasitif.

BAB V

Penutup

1.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi, implementasi, dan analisis data yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa:

- 1) Saat mesin induksi beroperasi di atas kecepatan sinkronnya dan diinjek tegangan pada nominal tertentu dari inverter, maka mesin akan beroperasi sebagai generator dan menyerap daya reaktif.
- 2) Kecepatan generator induksi akan menentukan besar daya yang dihasilkan, sehingga akan berpengaruh pada aliran daya sistem baik daya aktif maupun daya reaktif.
- 3) Daya pada sistem akan dijaga konstan oleh inverter dengan cara menyerap dan menyuplai daya. Maka dari itu, baterai sebagai media penyimpan sangat cocok digunakan pada sistem yang dapat beroperasi *bidirectional*.

1.2 Saran

- 1) Tugas akhir ini dibatasi pada implementasi yang bersifat *open-loop* untuk pengaturan tegangan dan frekuensi, serta membuktikan aliran daya pada sistem generator dan CC-VSI, untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan analisis implementasi secara *close-loop* untuk membuktikan kontrol tegangan dan arus pada sistem.
- 2) Dalam tugas akhir ini menggunakan metode pengaturan kecepatan generator untuk membuktikan aliran daya sistem, untuk selanjutnya dapat dilakukan analisis dengan menggunakan metode lain.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Muljadi and T. A. Lipo, “*Series Compensated PWM Inverter with Battery Supply Applied to an Isolated Induction Generator*,” IEEE Trans., vol. 30, pp. 1073-1082, Juli/Agustus 1994
- [2] E. G. Marra and J. A. Pomilio, “*Self-Excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Bidirectional Converter for Rural Application*,” IEEE Trans., vol. 35, pp. 877-883, Juli/Agustus 1999
- [3] S. J. Chapman, “*Electric Machinery Fundamentals*”, Mc Graw-Hill, NY, 2005
- [4] M. Rashid, “*Power Electronics Handbook*”, Academic Press, California, 2001
- [5] M. S. Abu-hamdeh, “*Modeling of Bi-directional Converter for Wind Power Generation*”, The Ohio State University, 2009
- [6] Infineon, “*Different PWM Waveforms Generation for 3-Phase AC Induction Motor with XC164CS*”, Infineon Technologies AG, Munchen, 2006
- [7] Jose R. Rodriguez, Juan W. Dixon, Jose R. Espinoza, and Pablo Lezana, “*PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art*”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. I, pp. 5-22, Feb. 2005.
- [8] Q. Muhammad. “Penurunan Rating Tegangan pada Belitan Motor Induksi 3 Fasa dengan Metode *Rewinding* untuk Aplikasi Kendaraan Listrik”, ITS, Surabaya, 2013.
- [9] A. Heri, “*Studi Regulasi Output Generator Induksi dengan Voltage Source Inverter*”, ITS, Surabaya, 2012.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

LAMPIRAN

Kode Arduino:

```
#include "avr/pgmspace.h"
#include "avr/io.h"

// Tabel sinusoidal satu periode (256 nilai) // Disimpan di memory
PROGMEM const unsigned char sine256[] = {
127,130,133,136,139,143,146,149,152,155,158,161,164,167,170,173,17
6,178,181,184,187,190,192,195,198,200,203,205,208,210,212,215,217,
219,221,223,225,227,229,231,233,234,236,238,239,240,242,243,244,24
5,247,248,249,249,250,251,252,252,253,253,253,254,254,254,254,
254,254,253,253,253,252,252,251,250,249,249,248,247,245,244,243,24
2,240,239,238,236,234,233,231,229,227,225,223,221,219,217,215,212,
210,208,205,203,200,198,195,192,190,187,184,181,178,176,173,170,16
7,164,161,158,155,152,149,146,143,139,136,133,130,127,124,121,118,
115,111,108,105,102,99,96,93,90,87,84,81,78,76,73,70,67,64,62,59,56,
54,51,49,46,44,42,39,37,35,33,31,29,27,25,23,21,20,18,16,15,14,12,11,
10,9,7,6,5,4,3,2,2,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,2,2,3,4,5,5,6,7,9,10,11,12,1
4,15,16,18,20,21,23,25,27,29,31,33,35,37,39,42,44,46,49,51,54,56,59,6
2,64,67,70,73,76,78,81,84,87,90,93,96,99,102,105,108,111,115,118,121
,124};

#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit)) //makro
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))

#define OFFSET_1 85 // menggeser fasa SPWM
#define OFFSET_2 170

int ledPin = 13; // LED pin 7
int testPin = 5;
int t2Pin = 4;
byte bb;

double dfreq;
// const double refclk=31372.549; // =16MHz / 510
const double refclk=31376.6; // measured

// Variabel untuk interrupt harus volatile
volatile byte icnt; // var inside interrupt
```

```

volatile byte icnt1;          // var inside interrupt
volatile byte c4ms;          // counter incremented all 4ms
volatile unsigned long phaccu; // phase accumulator
volatile unsigned long tword_m; // dds tuning word m

void setup()
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("DDS Test");

  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT); // Pin output SPWM
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);

  Setup_timer2();

  // Menonaktifkan timer interrupt untuk menghindari distorsi timer
  cbi (TIMSK0,TOIE0);          // disable Timer0 !!! delay() is now not
available
  sbi (TIMSK4,TOIE4);          // enable Timer4 Interrupt Overflow

  dfreq=50.0;                  // freq maks = 1000.o Hz
  tword_m=pow(2,32)*dfreq/refclk; // hitung tuning DDS
}

void loop()
{
  while(1) {
    if (c4ms > 250) {          // timer / Tunggu 1 detik
      c4ms=0;
      dfreq=50;                // Untuk atur freq output 0-1023Hz

      cbi (TIMSK4,TOIE4);      // nonaktifkan Timer4 Interrupt
      tword_m=pow(2,32)*dfreq/refclk; // Hitung tuning DDS
      sbi (TIMSK4,TOIE4);      // Aktifkan Timer4 Interrupt

      Serial.print(dfreq);
      Serial.print(" ");
    }
  }
}

```

```

    Serial.println(tword_m);
}

sbi(PORTD,4); // Test / set PORTD,4 high untuk membaca timing
dengan scope
cbi(PORTD,4); // Test /reset PORTD,4 high untuk membaca timing
dengan scope
}
}
}
//*****
*****

// set timer2
// set prscaler ke 1, PWM mode ke phase correct PWM, 16000000/510
= 31372.55 Hz clock

void Setup_timer2() {

// Timer4 Clock Prescaler ke : 1
sbi (TCCR4B, CS40);
cbi (TCCR4B, CS41);
cbi (TCCR4B, CS42);

// Timer4 PWM Mode set ke Phase Correct PWM
cbi (TCCR4A, COM4A0); // clear Compare Match
sbi (TCCR4A, COM4A1);
cbi (TCCR4A, COM4B0); // clear Compare Match
sbi (TCCR4A, COM4B1);
cbi (TCCR4A, COM4C0); // clear Compare Match
sbi (TCCR4A, COM4C1);

sbi (TCCR4A, WGM40); // Mode 1 / Phase Correct PWM
cbi (TCCR4A, WGM41);
cbi (TCCR4B, WGM42);
}

//*****
*****

// Timer2 Interrupt Service di 31372,550 KHz = 32uSec
// Timebase REFCLOCK untuk the DDS generator
// FOUT = (M (REFCLK)) / (2 exp 32)
// runtime : 8 microseconds ( inclusive push and pop)

```

```

ISR(TIMER4_OVF_vect) {

    sbi(PORTD,5);      // Test / set PORTD,5 high to observe timing with
                        // a oscope

    phaccu=phaccu+tword_m; // soft DDS, phase accu with 32 bits
    icnt=phaccu >> 24;    // use upper 8 bits for phase accu as
                        // frequency information
                        // read value from ROM sine table and send to
                        PWM DAC

    // Memberikan output SPWM pada Timer4
    OCR4A=pgm_read_byte_near(sine256 + (uint8_t)(icnt+OFFSET_1));
    OCR4B=pgm_read_byte_near(sine256 + icnt);
    OCR4C=pgm_read_byte_near(sine256 + (uint8_t)(icnt+OFFSET_2));

    if(icnt1++ == 125) { // increment variable c4ms all 4 milliseconds
        c4ms++;
        icnt1=0;
    }

    cbi(PORTD,5);      // reset PORTD,5
}

```


RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Resa Hidayat Pramasdeka, biasa dipanggil Resa. Penulis lahir di Purworejo, 16 Agustus 1995. Alamat rumah tempat penulis tinggal adalah Perum Tambakrejo 2 RT.01/08, Purworejo, Jawa Tengah. Perjalanan penulis dalam menimba ilmu cukup lancar hingga akhirnya penulis masuk Teknik Elektro ITS angkatan 2012/E52. Perjalanan itu dimulai dari TK Aba Purworejo, kemudian masuk SD Kliwonan Purworejo. Enam tahun kemudian lulus masuk SMP Negeri 2 Purworejo dimana penulis berkesempatan masuk ke kelas akselerasi dengan jangka waktu pembelajaran selama dua tahun. Setelah itu diterima di SMA Negeri 1 Purworejo yang mana merupakan kunci dari kehidupan yang sampai saat ini penulis jalani.

Hobi yang penulis lakukan yaitu olahraga, browsing internet, menonton film, dan belajar. Selama masa kuliah, penulis aktif mengikuti organisasi dan event-event yang ada di ITS. Penulis juga aktif di Unit Kegiatan Mahasiswa Merpati Putih di ITS sebagai anggota dan ketua periode 2014/2015. Pada bulan Januari 2017 penulis mengikuti seminar dan ujian Tugas Akhir sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro ITS.

e-mail : resa.hidayatp@gmail.com

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----